



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

KIMMO KORPELA

KANSIMEKANISMIN TUOTEKEHITYS

Diplomityö

Tarkastajat: professori Arto Lehtovaara ja yliopistonlehtori Sami Pajunen

Tarkastajat ja aihe hyväksytty automaatio-, kone- ja materiaalitekniikan tiedekunnan tiedekuntaneuvoston kokouksessa 5. lokakuuta 2011

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

**KORPELA, KIMMO:** Kansimekanismin tuotekehitys

Diplomityö, 62 sivua

Tammikuu 2012

Pääaine: Konejärjestelmien suunnittelu

Tarkastajat: professori Arto Lehtovaara ja yliopistonlehtori Sami Pajunen

Avainsanat: Maalipurkin kansi, Lämpilyöntilommahdus, Epälineaarinen elementtimenetelmä, Asiakaslähtöinen tuotekehitys

Tässä diplomityössä on suunniteltu Metalpak Oy:n tarpeisiin uudentyyppinen ohuen levyrakenteen jousto-ominaisuuksiin perustuva maalipurkin kansi. Nykyisin käytössä olevilla korvakekansilla ja painokansilla on havaittu olevan ongelmia joko hankalan avattavuuden, tai heikon uudelleensuljettavuuden osalta. Avattavuusongelmat ovat myös aiheuttaneet tapaturmia, johtuen yleensä muuhun käyttöön, kuin maalipurkkien avaamiseen tarkoitettujen työkalujen käytöstä kantta irrotettaessa.

Yksi merkittävimpiä tähän kehitystyöhön johtaneita syitä on ollut asiakkailta saatu palaute. Ennen kehitystyön aloittamista Metalpak Oy oli suorittanut asiakas- ja käyttäjälähtöisen tutkimus- ja kehitysprojektin, jonka yhteydessä kartoitettiin maalipurkin käyttäjien toiveita uudentyyppisen maalipurkin ominaisuuksista. Nämä toiveet pyrittiin huomioimaan rakenteen suunnittelussa mahdollisuuksien mukaan. Tavoitteeksi muodostui suunnitella kansi, jolla olisi nykyisten kansien hyvät ominaisuudet, mutta joka olisi myös avattavissa helposti ilman erillisiä työkaluja ja suljettavissa tiivistä käytön jälkeen useitakin kertoja.

Asiakastoiveiden lisäksi kannen suunnitteluun vaikuttivat voimakkaasti alaa säätelevät viranomaismääräykset. Täytetyn maalipurkin tulee lainsäädännön mukaan kestää vaativia kuormitustestejä, mikä tuli huomioida lujuustarkasteluissa ja rakenteellisten yksityiskohtien muotoilussa.

Suunnittelutyön apuna käytettiin elementtimenetelmällä toteutettuja staattisia rakenneanalyyssejä. Rakenneanalyysien keskeisenä pyrkimyksenä oli optimoida mekanismin avaamiseen ja sulkemiseen vaadittavat voimat tasolle, jolla kannen käyttö olisi mahdollista yhden henkilön voimin ilman työkaluja. Kannen käyttäytymisen luonteesta johtuen analyyseissa sovellettiin epälineaarisen elementtimenetelmän keinoja.

Tämän työn tuloksena on laadittu alustavat suunnitelmat uutta kansirakennetta ja siihen liittyvää muovista varmistinrengasta varten. Kannen lopullinen toimivuus on varmistettava vielä mittatarkan prototyypin avulla.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

**KORPELA, KIMMO:** Product Development of Lid Mechanism

Master of Science Thesis, 62 pages

January 2012

Major: Machine Design

Examiners: professor Arto Lehtovaara and university lecturer Sami Pajunen

Keywords: Paint can lid, Snap through buckling, Nonlinear finite element method, Customer based product development

In this thesis work a new kind of paint can lid mechanism has been designed for Metalpak Oy. The mechanism is based on snap through buckling of a thin sheet metal structure. Old paint cans that are in use these days have undesirable properties that make them difficult and sometimes even dangerous to use.

One major factor behind this thesis work was customer feedback. Before the actual product development Metalpak Oy arranged a research project to find out what kind of properties the customers wish paint cans to have. These wishes have influenced the project throughout as the final product has been design to satisfy as many major customer needs as possible. The new kind of paint can lid was to be easily opened without tools and closable after use.

The official regulations for chemical container safety also needed to be taken into account when designing the new product. A new kind of paint container will undergo a series of stress tests before being allowed to be used in transportation, which had a big impact when designing certain structural details.

The structural analysis of the product was done using finite element method and the aim was to ensure at least the theoretical functionality. The nature of the behavior of the product required use of nonlinear finite element techniques.

As the outcome of this thesis work a preliminary design for the new paint can lid was completed, but the final estimations of the functionality still needs to be confirmed by manufacturing a physical prototype.

## ALKUSANAT

Aloittaessani tämän diplomityön tekemisen tammikuussa 2011, uskoin työn suorittamisen ja kirjoittamisen olevan melko suoraviivainen prosessi. Alkuperäisenä tarkoituksena oli laskennallisesti tarkastella jo osittain suunnitellun uuden tuotteen toimivuutta. Talven kääntyessä kevääksi huomasin kuitenkin jo käyttäneeni huomattavasti aikaa opetellessani tehokkaasti käyttämään uusia projektin vaatimia työkaluja, minkä lisäksi koko työ oli saanut uusia suuntaviivoja ja laskentatehtävä alkoi muistuttaa täysimittaista tuotekehitysprojektia. Lujuuslaskennan analyysit osoittautuivat hyvin aikaa vieviksi ja pienestäkin yksityiskohdan muutoksesta tuotteessa seurasi uusi pitkälinen laskentaprosessi monine iteraatiokierroksineen sopivien mittojen ja ainevahvuuksien löytämiseksi.

Varsinaisen kirjoittamistyön pääsin aloittamaan kesän aikana ja vaikka sainkin työle nopeasti mielestäni toimivan rungon, ei kirjoittaminen ole ollut pelkkää ruusuilla tanssimista. Työn kohteena olleen tuotteen näennäisestä yksinkertaisuudesta huolimatta sen toiminnan taustalla oleva lujuusopillinen teoria on hyvin monisyinen, mistä johtuen lähteinä toimineiden teknisten dokumenttien tulkinta ja esittäminen ymmärrettävässä muodossa on ollut kovan työn takana.

Diplomityö on ensimmäisenä vaativampana työsuorituksena ollut opettavainen kokemus. Jälkeenpäin toivon että olisin työn aikana osannut useammin kysyä neuvoa ja käyttänyt tehokkaammin hyödykseni mahdollisuutta työskennellä yhteistyössä asiantuntevien ammattilaisten kanssa niin yliopistolla kuin asiakasyrityksessäkin. Taaksepäin katsoessani huomaan liian usein jääneeni pohdiskelemaan vastaan tulleita ongelmia yksin, toivoen ratkaisun valkenevan ajan kanssa. Tämä on toisaalta huono, mutta toisaalta myös hyvä asia. Vaikka olisin varmasti säästänyt työssäni aikaa ja vaivaa pyytämällä apua asiaankuuluvilta henkilöiltä, olen viimeistään tämän prosessin aikana oppinut, ettei kaikesta tarvitse, eikä voikaan selvitä ilman apua.

Työn tiimoilta haluaisin vielä kiittää erinäisiä tahoja. Kiitokset Metalpak Oy:n henkilökunnalle, erityisesti Johannes Räikköselle ja Pertti Pirttijoelle diplomityön aiheesta ja neuvonannosta työn monissa vaiheissa, sekä yrityksen ulkopuoliselle suunnittelijalle Aimo Tiikkajalle. Tampereen Teknillisen Yliopiston Konstruktitekniikan laitokselta kiitän Sami Pajusta ja Arto Lehtovaaraa työn tarkastamisesta ja avusta teknillistä mekaniikkaa koskevissa kysymyksissä. Lisäksi kiitän vanhempiani Timo ja Pirkko Korpelaa, sekä sukulaisiani ja ystäviä, jotka ovat toimineet henkisenä ja toisinaan myös taloudellisenä tukena koko opintojeni ajan ja pitempääkin. Erityiskiitos vielä kahvila Motivaatorille, jonka viihtyisästä ilmapiiristä ja maukkaasta kahvista olen saanut lisää vauhtia luomistyölle aina motivaation hiipuessä.

Tampereella 18.01.2012

Kimmo Korpela

# SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
1.1	Työn tausta.....	1
1.2	Työn tavoitteet .....	2
1.3	Työn rakenne.....	3
2	Laskennan teoria .....	5
2.1	Rakenneanalyysin lujuusopillinen tausta.....	5
2.2	Elementtimenetelmä laskentatyökaluna .....	12
2.2.1	Lineaarinen ja epälineaarinen elementtimenetelmä .....	14
2.2.2	Epälineaarisen elementtianalyysin numeeriset menetelmät.....	17
2.2.3	Lommahdusongelman ratkaisu Ansys-ympäristössä.....	24
3	Olemassa olevien kansikonstruktioiden analysointi .....	26
3.1	Korvakekansi .....	26
3.2	Painokansi.....	28
3.3	Vannepainokansi .....	30
4	Maalipurkin kannen suunnittelu .....	32
4.1	Tuotteelle asetetut vaatimukset.....	32
4.2	Alkuperäinen konsepti ja alustavat laskelmat.....	34
4.3	Uuden tuotteen kehitysprosessi.....	39
4.4	Prototyypin valmistuksen suunnittelu .....	54
5	Lopputulosten tarkastelu .....	57
6	Yhteenveto.....	59
	Lähdeluettelo .....	61

## LASKUJEN SYMBOLIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

$M$	Momentti
$F$	Voima
$l$	Pituus
$\theta$	Kääntymiskulma
$k$	Jousivakio
$\sigma_H$	Materiaalin jännitys
$E_H$	Jäykkyysmatriisi
$\epsilon_H$	Venymä
$R_e$	Solmuvoimavektori
$k_e$	Elementin jäykkyysmatriisi
$q_s$	Elementin siirtymävektori
$R_r$	Rakenteeseen kohdistuvat voimat
$K_r$	Kokonaisjäykkyysmatriisi
$q_r$	Siirtymävektori
$G_r$	Geometrinen jäykkyysmatriisi
$r$	Sisäisten voimien vektori
$q_i$	Solmusiirtymävektori
$\lambda p_{ref}$	Ulkoisten kuormien vektori
$\lambda$	Kuormituskerroin
$\Delta( )$	Muutos
$K_T$	Tangenttijäykkyysmatriisi

# 1 JOHDANTO

Monet ihmiset päätyvät jossain vaiheessa elämäänsä maalaamaan, oli kyse sitten ammattimaisesta teollisuusmaalaamisesta, satunnaisesta remontista tai vaikkapa taiteesta. Tämän seurauksena maailmanlaajuisesti valtava käyttäjäkunta päätyy toimimaan maalipurkkien kanssa, ja useimmilla meistä onkin jonkinlainen kuva maalipurkkien käytön hankaluuksista. Purkeista valuu maalia lattialle ja maali voi roiskua ympäriinsä jos kannen avaamisessa joudutaan käyttämään voimaa. Toisinaan kansi tiivistyy heikosti jolloin seuraavalla käyttökerralla maalin pinta on kuivunut ja kovettunut. Monet käyttävät tiukkojen kansien avaamiseen turvallisuusohjeista huolimatta teräaseita ja ruuvimeiselleitä, mistä syntyy selkeitä vaaratilanteita. Vastaavista ongelmista saataisiin aikaan pitkä lista.

Vaikka nykyisillä maalipurkeilla tunnustetaan yleisesti olevan omat huonot puolensa, on maalipurkkien rakenne silti säilynyt vuosikausien ajan jokseenkin muuttumattomana. Toisinaan markkinoille ilmaantuu totutusta poikkeavia säilytys- ja työvälineratkaisuja maalareiden työtä helpottamaan, mutta monesti näillä uusilla ratkaisulla huomataan nopeasti olevan aivan uusia ongelmia, jonka jälkeen työkalukanta palautuu tuttuun ja turvalliseen. Silloin tällöin uusien keksintöjen joukosta nousee kuitenkin helmiä, jotka tulevat jäädäkseen ja uudistavat merkittävästi alaa. Tällaisesta keksinnöstä hyvänä esimerkkinä on maalitela, jollainen löytyy Suomessakin useimmista remontoitavista kotitalouksista.

Tässä työssä käydään läpi uudentyypin maalipakkauksen kannen tuotekehitysprosessin luonnosteluvaihe. Tämän uuden kannen ei ole tarkoitus ratkaista kaikkia maailman maalaamiseen liittyviä ongelmia, eikä välttämättä edes korvata kaikkia nykyään käytössä olevia kansityyppejä. Kantavana ajatuksena on esitellä yksi mahdollinen askel kohti käytännöllisempää ja turvallisempaa maalipurkkia, minkä toteutuessa käyttäjille voitaisiin tarjota miellyttävää työskentelyä edistävä pakkausvaihtoehto.

## 1.1 Työn tausta

Diplomityön teetti Metalpak Oy, päätavoitteenaan kehittää yrityksen tuotevalikoimaan uudentyypinen, helposti avattava maalipurkki. Metalpak Oy on Lempäälän Sääksjärvellä toimiva, v. 1983 perustettu pakkausalan yritys. Se siirtyi Kiilto Oy:n omistukseen v. 1986 ja työllistää tänä päivänä noin 45 henkeä. Tuotantotilat käsittävät 2000m<sup>2</sup> kolmella automaattisella tuotantolinjalla varustetun tehdashallin, jossa valmistetaan metallisia pakkauksia pääasiassa maali-, kemian- ja elintarviketeollisuuden tarpeisiin. Tuotannosta suurin osa päätyy kotimaan markkinoille, vientiin valmistettavista tuotteista menee noin viidennes. Nykyisessä tuotekannassa valmistettavat teknokemian pakkauk-

set varustetaan joko korvake-, paino- tai vannepainokannella. Näillä kaikilla on omat, sekä hyvät että huonot, puolensa ja niitä tarkastellaan lähemmin luvussa kolme.

Uuden pakkaustyyppin kehittämiseksi oli aluksi suoritettu mielipidetutkimus yhteistyössä maalin valmistajien ja käyttäjien kanssa. Tutkimuksen perusteella pakkausta varten luotiin lista vaatimuksia ja toivomuksia, jotka pakkauksen tulisi täyttää. Tämä lista esiteltiin sitten eteenpäin Länsi-Suomen Muotoilukeskus Muovalle, jonka kanssa yhteistyössä alettiin kehittää muutamia erilaisia konseptisuunnitelmia useammille uudentyyppisille pakkauksille. Mainittuihin vaatimuksiin ja toivomuksiin palataan lähemmin luvussa 4.1.

Tämän työn tutkimuskohteeksi valittiin muotoilukeskuksen esittelemistä konseptivaihtoehtoista yksi erityistyyppinen kansi, joka tulisi mahdollisesti olemaan yhteenso-piva jo olemassa olevien maalipurkkien kanssa. Uudentyyppisen kannen toimintameka-nismin tuli perustua ohuen kuorirakenteen jousto-ominaisuuksiin ja tätä lähtöajatus-ta kuljetettiin mahdollisuuksien mukaan mukana läpi koko suunnitteluprosessin. Kantta varten oli jo etukäteen tehty alustavia suunnitelmia ja laskelmia yhteistyössä Muovan sekä Tampereen Teknillisen Yliopiston Konstruktiotekniikan laitoksen kanssa. Nämä suunnitelmat eivät kuitenkaan vielä tarjonneet riittävää varmuutta suunnittelun jatkami-sen kannattavuudesta, joten aihetta päätettiin tutkia vielä laajemmin diplomityön muo-dossa. Työn lähtökohtana toiminut maalipurkkikonsepti esitellään tarkemmin luvussa 4.2.

## 1.2 Työn tavoitteet

Työn keskeisenä tavoitteena on laajentaa asiakasyrityksen tuotevalikoimaa uudentyyppisellä maalipurkin avaamis- ja sulkemismekanismeilla. Alkuperäinen tavoite jakaantui kahteen vaihtoehtoiseen osaan. Ensimmäinen vaihe oli toteuttaa teollisen muotoilijan luoman alustavan kansikonseptin toiminnan laskennallinen tarkastelu tuotteen jatkokehittämisen kannattavuuden toteamiseksi. Mikäli tämän tarkastelun lopputuloksena todettaisiin kyseisen konseptin olevan kannattamaton, olisi toinen vaihtoehtoinen tavoite suorittaa tuotekehitysprojekti parantamalla jotakin olemassa olevaa tuotetta, tai mahdollisuuksien ja aikataulun rajoissa alkaa kehittää kokonaan uutta kansiratkaisua. Lopputuloksesta riippumatta kehitysprojektin tuloksena muodostuneelle kansimallille tuli saada rakennettua fyysinen prototyyppi, jonka toimintaa voitaisiin testata käytännössä. Mikäli tämän jälkeen tuotteen todettaisiin soveltuvan massatuotantoon, tulisi sille suunnitella soveltuva valmistusmenetelmä ja tämän menetelmän vaatimat työkalut.

Vaikka tavoitteena on kokonaisvaltainen tuotekehitysprojekti, on työtä lujuusopillisten näkökohtien ja elementtilaskennan keskeisestä asemasta johtuen pyritty lähestymään laskennallisesta näkökulmasta, jättäen erilaiset tuotekehitysmenetelmät vähemmälle huomiolle. Työn teoriaosuus käsittelee lähes yksinomaan suunniteltavaan mekanismiin liittyviä lujuusopillisia ominaisuuksia ja näiden mallintamiseen käytettyjä työkaluja. Kyseisten seikkojen käsittely on olennaista, sillä niihin perehtyminen on olennaista jotta ymmärrettäisiin mitkä ovat olleet suunnittelutyön suurimmat haasteet ja miksi simuloin-



timallien luominen tuotteesta ei ole ollut niin yksinkertainen prosessi, kuin varsinaista työnkuvausta käsittelevä kappale voisi antaa lukijan ymmärtää.

### 1.3 Työn rakenne

Työssä lähdetään liikkeelle suunniteltavan tuotteen mekaanisen toiminnan taustalla olevasta teoriasta. Kuten edellä on mainittu, lähestytään teoriaosuudessa suunniteltavaa tuotetta lujuusopillisesta näkökulmasta. Kappaleessa 2.1. käydään läpi lujuuslaskennan keskeiset peruskäsitteet, joita havainnollistetaan muutamien esimerkkien avulla. Nämä peruskäsitteet ovat työn kannalta tärkeitä, sillä niiden avulla voidaan kuvata yksiselitteisesti suunniteltavan kappaleen mekaanista käyttäytymistä. Tuotteen toiminnassa keskeinen rooli on niin kutsutulla läpilyöntilommuksella, jonka laskennallinen tarkastelu on koko teoriaosion ydinasia.

Teoriaosuudessa tutustutaan myös yleisesti elementtimenetelmään laskentatyökaluna ja mekaanisen suunnittelun apuvälineenä. Kappaleessa 2.2. tutustutaan lyhyesti elementtimenetelmän toimintaperiaatteeseen, taustoihin ja sovelluskohteisiin. Samassa yhteydessä käsitellään lineaarisen ja epälineaarisen analyysin eroavaisuudet, joista selviää, miksi tämän työn tapauksessa tarkasteltavan epälineaarisesti käyttäytyvän kappaleen realistinen mallintaminen on ollut haastava prosessi. Kappaleissa 2.2.2. ja 2.2.3. esitellään muutamia yleisesti käytettyjä epälineaarisen elementtianalyysin numeerisia menetelmiä ja tutustutaan työssä käytetyn Ansys – ohjelmiston tarjoamiin keinoihin hyödyntää epälineaarisen analyysin työkaluja lommuksilmiön analysoinnissa.

Kappaleessa kolme esitellään Metalpak Oy:n nykyinen maalipurkkikanta. Tässä tutkiskellaan jo olemassa olevien maalipurkkien rakennetta, toimintaperiaatteita, sekä hyviä ja huonoja puolia. Analyysi purkkien rakenteista ja ominaisuuksista on koostettu osin yrityksen henkilökunnan kanssa käydyistä keskusteluista ja osin oman empiirisen tarkastelun perusteella. Nykyisten maalipurkkien hyvien ja huonojen puolien kartoittamisen apuvälineenä on myös käytetty työn taustavaikuttajana toiminutta asiakaskyselyä.

Neljännessä kappaleessa käydään läpi varsinainen suunnitteluprosessi. Kappaleen alussa esitetään tuotekehitysprojektin lähtökohdat ja suunnittelukriteerit. Ennen varsinaisen omakohtaisen tuotesuunnittelun aloittamista tutustutaan projektia varten tehtyyn esityöhön ja tuotteelle asetettuihin vaatimuksiin. Tämän jälkeen projektissa edetään kronologisessa järjestyksessä, aloittaen alkuperäiselle konseptille suoritetuista laskennallisista tarkasteluista ja päättyen erilaisten rakennemuutosten ja näille suoritettujen elementtianalyysien kautta lopulliseen ratkaisuun. Muotoilussa tehtyjen muutosten joista välivaihetta ei ole nähty tarpeelliseksi esitellä yksityiskohtaisesti, sillä suunnittelussa edettiin lukuisten pienten korjauksien ja laskentakierroksien kautta yhdestä vaiheesta toiseen. Työssä siis käsitellään ne merkittävät suunnitteluprosessin vaiheet, joiden kohdalla rakenteen käyttäytymisessä on havaittu huomattavia eroavaisuuksia.

Huomionarvoista on, että suunnitteluprosessin aikana alkuperäisestä konseptista luovuttiin elementtianalyysien perusteella lähes täysin, säilyttäen rakenteessa vain se lujuusopillinen ilmiö, johon tuotteen mekaaninen toiminta perustuu. Alkuperäisen

suunnitelman ja lopullisen tuloksen välillä voidaan siis nähdä suuri ero. Tämä hyppäys yhdestä konseptista toiseen kesken tuotesuunnitteluprosessin on ollut huomattavin yksittäinen tekijä työn venymisessä suunnitellusta aikataulusta.

Neljännän kappaleen lopussa käydään läpi alustavia suunnitelmia tuotteen valmistuksesta ja testauksesta. Vaikka tätä kirjoittaessa ei tuotteesta ehditty luoda tarkkaa prototyyppiä, antoivat karkeat mallikappaleet rohkaisevia viitteitä tuotteen toiminnasta. Tuotteen valmistusta ja siinä käytettäviä työkaluja varten tehtiin joitakin suunnitelmia, mutta pääasiassa suunnitteluvastuu valmistuksesta siirrettiin ulkopuoliselle taholle.

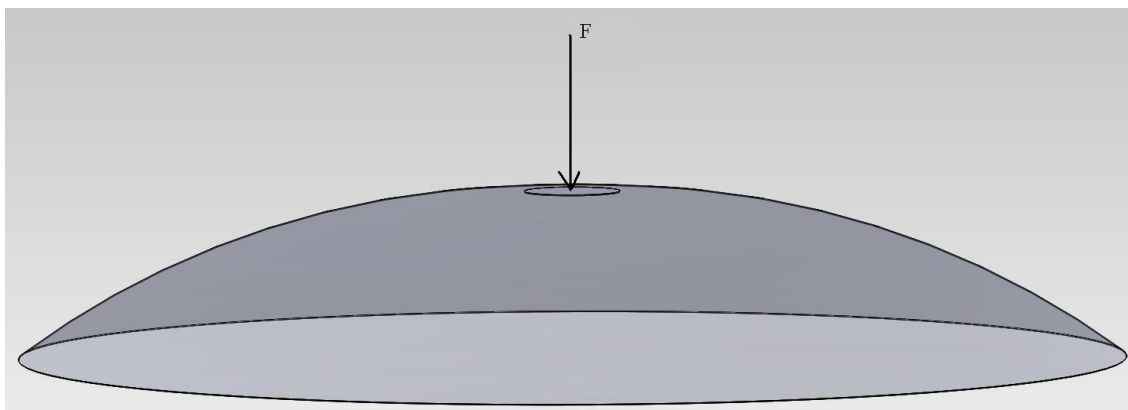
Viidennessä kappaleessa esitellään vielä tuotesuunnittelun lopputulos ja joitakin omia pohdintoja koskien tuotteen toimivuutta ja jatkokehitystä. Tarkkoja työpiirustuksia tähän yhteyteen ei ole liitetty johtuen yrityksen toiveesta pitää tuotteen yksityiskohdat salassa projektin loppuun asti, mutta tuotteesta on nähtävillä joitakin periaatekuvia, joista pääpiirteittäin selviää sen rakenne ja toiminta. Lopulta kappaleessa kuusi on vielä yhteenveto työn kulusta ja lopputuloksista.

## 2 LASKENNAN TEORIA

Tämä teoriaosio keskittyy käsittelemään suunnitellun maalipurkin kannen mekaanisen toiminnallisuuden taustalla olevia lujuusopillisia käsitteitä ja ilmiöitä, sekä rakenneanalyysiin käytetyn elementtimenetelmän toimintaa ja työkaluja. Kappale alkaa staattisen rakenneanalyysin taustalla vaikuttavien peruskäsitteiden selittämisestä, joita on havainnollistettu kuvallisilla esimerkeillä. Näiden käsitteiden ymmärtäminen on hyödyllistä, sillä niiden avulla selviää miksi juuri tässä työssä suoritettujen rakenneanalyysien ratkaisemiseksi on jouduttu käyttämään epälineaarista elementtimenetelmää ja mistä suunnittelun haasteet ovat peräisin. Seuraavaksi esitellään elementtimenetelmä työkaluna ja käydään lyhyesti läpi lineaarisen ja epälineaarisen ongelman eroavaisuudet. Lopuksi käydään vielä läpi joitakin suosittuja epälineaaristen ongelmien ratkaisuun käytettyjä matemaattisia työkaluja.

### 2.1 Rakenneanalyysin lujuusopillinen tausta

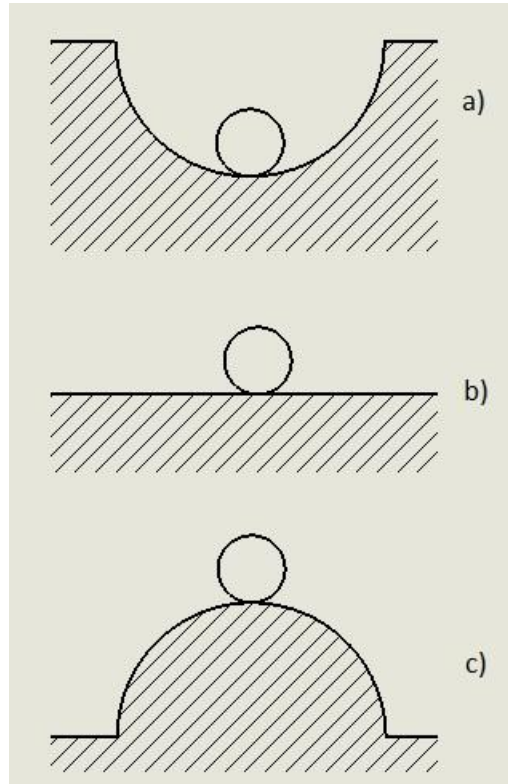
Työn tarkoitus oli suunnitella maalipurkin kansi, joka perustuisi ohuen teräslevyrakenteen niin kutsuttuun ”Snap Through” – lommahtamiseen, eli läpilyöntiin. Kuten myöhemmin kappaleessa 4.3. selviää, on lopullisen tuotteen kannalta erityisen oleellinen ilmiö kuvan 2.1. mukaisen kupumaisen ja tasapaksun kuorirakenteen läpilyönti-ilmiön tarkastelu. Kaarevaa, reunoiltaan tuettua levyä painetaan keskeltä alaspäin kasvavalla voimalla, jolloin voiman kasvaessa riittävän suureksi tapahtuu läpilyönti. Tällöin levy muuttaa muotoaan lommahtaen toiselle puolelle likimain peilikuvakseen. /5/ Ilmiön ymmärtämiseksi on hyvä tutustua muutamaa lujuusopin peruskäsitteisiin, jotka tässä tapauksessa ovat stabiilisuus, lineaarisuus ja kimmoisuus. /1/



**Kuva 2.1.** Painettaessa pyörähdyssymmetristä ja kupumaista kuorirakennetta keskeisesti alaspäin riittävän suurella voimalla tapahtuu rakenteessa läpilyönti.

## *Stabiilisuus*

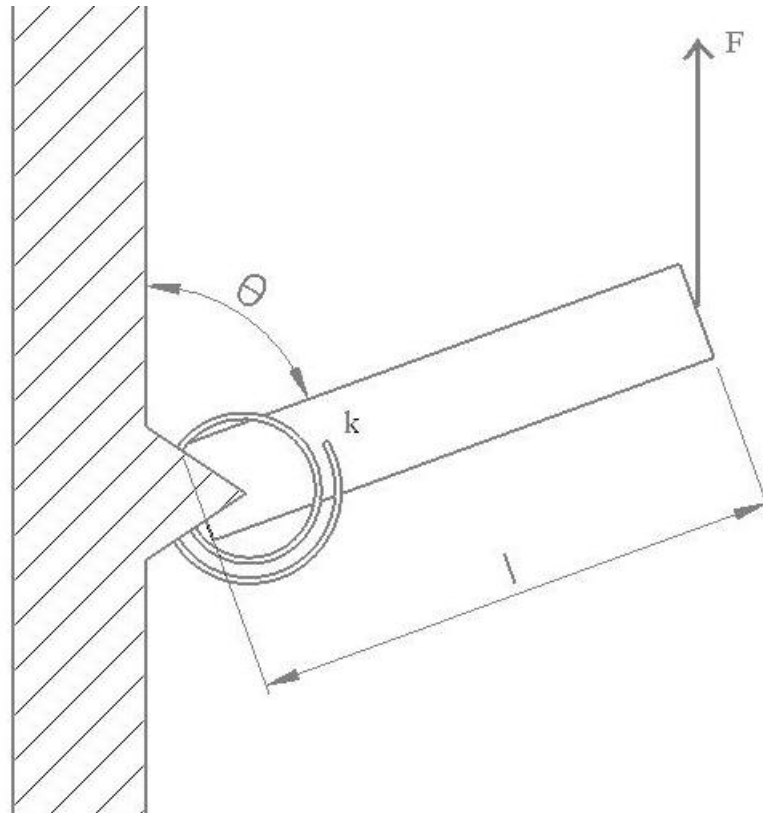
Stabiilisuus on yksi rakenteellisen lujuusanalyysin pääkohdista, muiden ollessa rakenteen lujuus ja jäykkyys. Kun mekaanista, tasapainossa olevaa, systeemiä häiritään lievästi esimerkiksi ulkoisella voimalla, syntyy seurauksena usein monimutkainen dynaaminen liike, jossa systeemi poistuu ainakin hetkellisesti staattisesta tasapainoasemastaan. Rakenteen stabiiliutta tutkittaessa halutaan selvittää pyrkiikö tällainen systeemi takaisin alkuperäiseen tasapainoasemaansa kun häiritsevä tekijä poistetaan, vai loittoneeko se siitä annetun herätteen seurauksena. Tilannetta voidaan havainnollistaa kuvasarjan 2.2. mukaisella analogialla, missä painovoiman vaikutuksen alainen pallo asetetaan vuoroin kolmelle erilaiselle tukipinnalle ja seurataan mitä tapahtuu kun palloa tönäistään. Ensimmäisen kuvan kuopassa oleva pallo palautuu painovoiman vaikutuksesta takaisin lähtöasemaansa tönäisyyn jälkeen, mikä vastaa stabiilia eli vakaata tasapainoasemaa. Kolmannessa kuvassa kumpareen päälle oleva pallo lähtee tönäisyyn seurauksena loittonemaan lähtöasemastaan, jolloin tasapaino on labiili eli horjuva. Näiden välissä on vielä ns. rajatapaus, indifferentti eli epämääräinen tasapainoasema. Periaatteessa staattisesti kuormitettu rakenne käyttäytyy analogisesti kuvan esimerkin kanssa niin, että tasapainotilastaan pakottamalla poikkeutettu rakenne voi poikkeutuksen poistamisen jälkeen palautua joko alkuperäiseen muotoonsa, tai jatkaa muodonmuutosta stabiiliustilanteesta riippuen. Kuvatunlaista analogiaa voidaan soveltaa tarkasteltaessa lujuusopillisten ilmiöiden stabiilisuutta ja epästabiilisuustilanne esiintyykin esimerkiksi juuri läpilyönti-ilmiön yhteydessä. /1/



**Kuva 2.2.** *Systeemin tasapainotilaa voidaan kuvata kolmella tavalla. a) Stabiilissa tasapainotilassa poikkeutettu systeemi pyrkii palautumaan alkuperäiseen tilaansa. b) Indifferentissä tasapainotilassa systeemi jää siihen tilaan, johon se on poikkeutuksen seurauksena päätynyt. c) Labiilissa tasapainotilassa systeemin sisäiset voimat jatkavat poikkeutuksesta aiheutunutta liikettä, saaden systeemin loitonemaan alkuperäisestä tasapainoasemasta /1/*

### *Kinemaattinen lineaarisuus*

Lujuusopissa lineaarinen muodonmuutos tarkoittaa tilannetta, jossa kuormitetun rakenteen muoto muuttuu samaa tahtia ulkoisen kuormituksen kanssa. Vaikka todellisuudessa puhtaasti täysin lineaarista muodonmuutosta ei koskaan tapahdu, johtuen materiaalien epätäydellisyyksistä ja ympäristötekijöistä, voidaan silti joissakin muodonmuutostapauksissa approksimoida muutoksen käyttäytyvän lähestulkoon lineaarisesti. Tämä on tyypillistä homogeenisilla materiaaleilla ja suhteellisesti pienillä muodonmuutoksilla. Suurempien muodonmuutosten ilmetessä, sekä joissakin muissa tapauksissa muodonmuutos voi muuttua selvästi epälineaariseksi. Epälineaarisen muodonmuutoksen edellytyksiä käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.2.2. Havainnollistava esimerkki epälineaarisesta käyttäytymisestä on kuvassa 2.3. esiteltävä jousituettu palkki, mistä nähdään miksi epälineaarisen käyttäytymisen huomioiminen on erityisen merkittävää suurilla muodonmuutoksilla. /1/



**Kuva 2.3.** Jousituettu palkki käyttäytyy kuormitettaessa epälineaarisesti. Kääntymiskulman muuttuessa jousi kiristyy ja kulman lisäämiseen vaadittavan voiman suuruus muuttuu kiihtyvällä nopeudella. /9/

Kuvassa näkyvä palkki on tuettu seinään kiinnitetyllä jousella. Palkin päätä nostetaan ylöspäin voimalla  $F$ , jolloin jousi kiertyy akselinsa ympäri. Kiertymisen seurauksena momenttivarsi lyhenee aiheuttaen jousen kiristymisen. Palkin tuettuun päähän kohdistuva momentti voidaan esittää muodossa:

$$M = F * l * \cos\theta \quad (1)$$

Tässä  $l$  on palkin pituus ja kulma  $\theta$  kuvaa palkin kääntymää. Voimatasapainon mukaisesti momentti voidaan suhteuttaa jousessa tapahtuneeseen muodonmuutokseen seuraavasti:

$$M = k * \theta \quad (2)$$

Tässä  $k$  on jousen jousivakio. Tällöin voidaan kirjoittaa:

$$F = \frac{k \cdot \theta}{l \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

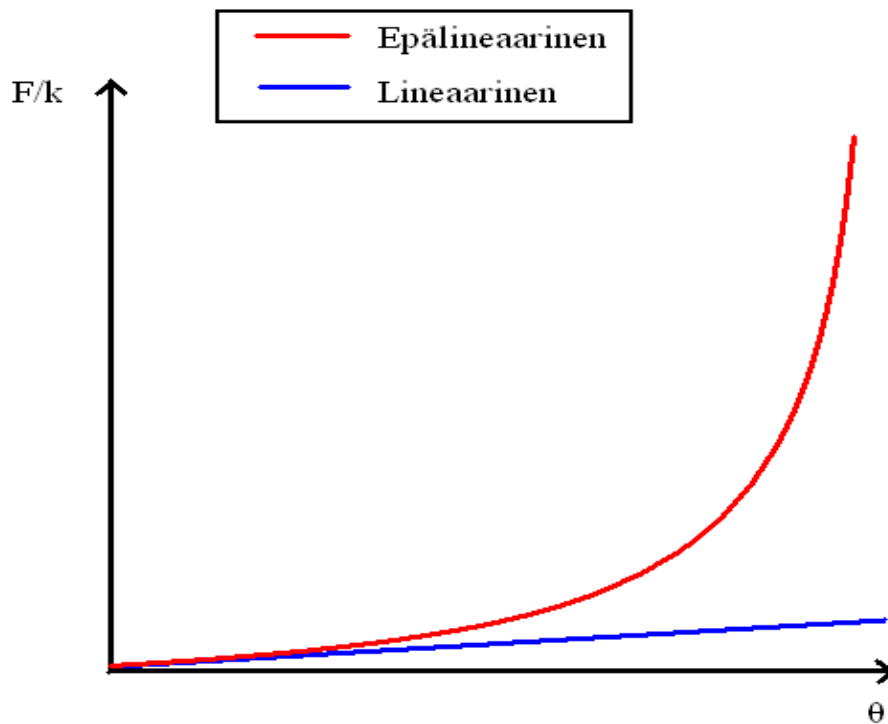
Tämän kaavan mukaan palkin kääntämiseen vaadittava voima kasvaa kiihtyvällä nopeudella, kun kulmaa kasvatetaan. Hyvin pienillä kulman  $\theta$  arvoilla voidaan approksimoida:

$$\cos \theta \rightarrow 1 \quad (4)$$

Tällöin kaava (3) pelkistyy muotoon:

$$F = \frac{k \cdot \theta}{l} \quad (5)$$

Tästä nähdään, että pienillä kulman  $\theta$  arvoilla rakenteen muodonmuutuskäyttäytyminen on lähes lineaarista. Suurilla kulman arvoilla edellä tehty approksimaatio ei kuitenkaan ole voimassa. Asetetaan vielä epälineaarista ja lineaarista muodonmuutuskäyttäytymistä kuvaavat käyrät samaan kuvaajaan 2.4. josta voidaan havaita kahden käyttäytymismallin välinen ero.



**Kuva 2.4.** Epälineaarisen käyttäytymisen merkitys systeemin muodonmuutoksia tarkasteltaessa kasvaa sen mukaan, mitä suurempia muodonmuutoksia rakenteessa esiintyy.

Kuten kuvaajasta voidaan havaita, pienellä siirtymällä on jokseenkin merkityksettöä, oletetaanko muodonmuutoksen tapahtuvan lineaarisesti vai epälineaarisesti. Kulman kasvaessa epälineaarisuuden merkitys kuitenkin korostuu eikä lineaarisen käyttäytymisen malli enää vastaa todellisuutta. /9/

### *Kimmoisuus*

Stabiilisuuden ja lineaarisuuden lisäksi kolmas läpilyönti-ilmiön kannalta merkittävä ominaisuus on kimmoisuus, joka kuvaa kappaleessa muodostuvan venymän ja jännityksen välistä yhteyttä. Lineaarisen muodonmuutoksen tapauksessa tätä suhdetta kuvaa niin kutsuttu *Hooken laki*, jonka mukaan jännitysvektori saadaan laskettua suoraan kertomalla venymävektori rakenteen jäykkyyismatriisilla. Huomionarvoista on että Hooken laki on voimassa materiaalin kimmoisen käyttäytymisen alueella. Matemaattinen esitys Hooken laille on seuraavanlainen:

$$\sigma_H = E_H \epsilon_H \quad (6)$$

Tässä

$\sigma_H$  = Vektori, joka kuvaa materiaalin jännitystä

$E_H$  = Jäykkyyismatriisi

$\epsilon_H$  = Vektori joka kuvaa rakenteen venymiä

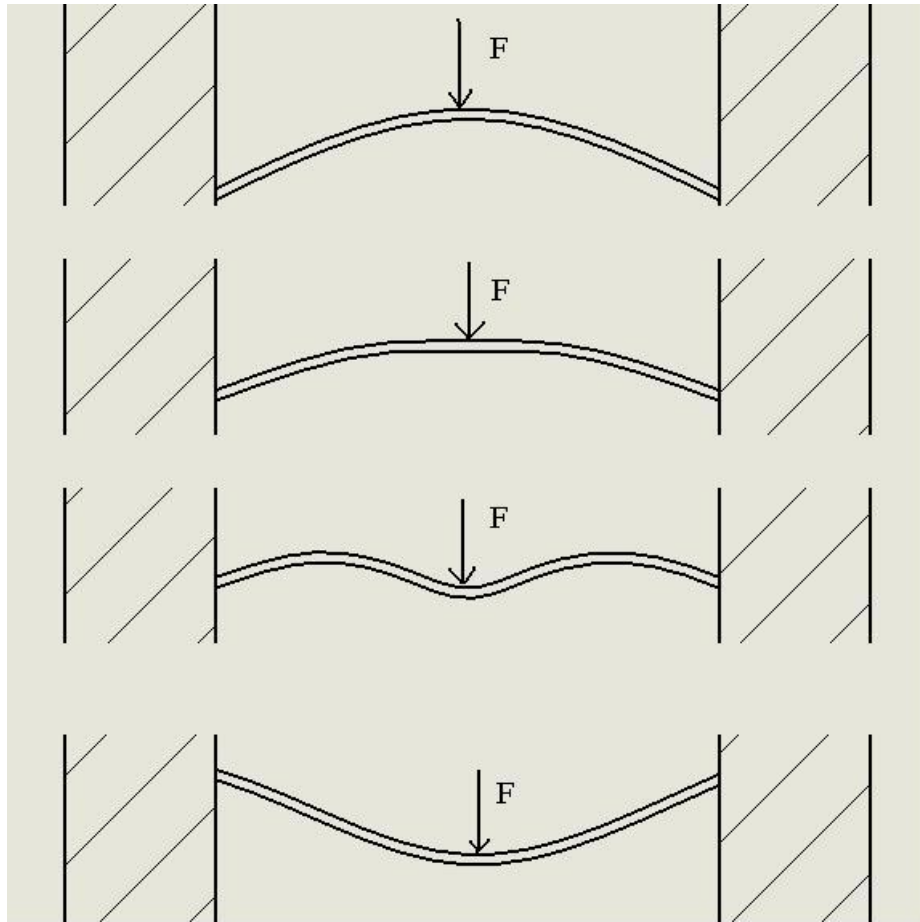
Mikäli materiaalin jännitys nousee niin suureksi että se aiheuttaa materiaaliin plastista muodonmuutosta, ei Hooken lakiin voi enää turvautua ennustettaessa mekaanista käyttäytymistä. Myös epälineaarinen muodonmuutoskäyttäytyminen ja esimerkiksi murtumat aiheuttavat poikkeuksia Hooken lakiin. Rajajännitystä jota suuremmilla jännityksen arvoilla materiaali ei enää käyttäydy kimmoisesti kutsutaan materiaalille ominaiseksi kimmorajaksi. /1/

### *Läpilyönti*

Läpilyönti siis tarkoittaa kaarevan levyn, palkin tai muun vastaavan rakenteen lommahdamista tasapainoasemasta toiseen. Kupumaista, reunoiltaan tuettua, kuorirakennetta keskeltä painettaessa se aluksi muuttaa muotoaan jännityksen kasvaessa lähes lineaarisesti. Kuormituksen seurauksena kuori puristuu kasaan, kunnes saavutetaan ns. *kriittinen lommahduskuormitus*. Tällöin kuori kokee äkillisesti suuren siirtymän ja ”pöksähtää” reunansa kiinnitystason yli toiselle puolelle muodostaen likimain peilikuvan alkuperäisestä muodostaan. Tämä äkillinen siirtymä tapahtuu epälineaarista tasapainopolkua pitkin niin, että rakenteen muodonmuutos etenee nopeasti kohti vastakkaista tasapainoasemaansa, kun voimaa kasvatetaan vain hyvin vähän yli kriittisen rajan. Rakenteessa



tapahtuva muodonmuutos etenee kupumaisen rakenteen poikkileikkauksen käyttäytymistä karkeasti havainnollistavan kuvasarjan 2.5. mukaisesti. /5/



**Kuva 2.5.** Poikkileikkauskuva läpilyönnin etenemisestä kaarevassa, reunoilta tuetussa rakenteessa.

Suunniteltavan tuotteen tapauksessa syntyneen siirtymän on tarkoitus tapahtua täysin kimmoisen muodonmuutoksen rajoissa, niin ettei plastisia muodonmuutoksia pääse syntymään. Tämä on ehdoton edellytys tässä työssä suunniteltavan mekanismin uudelleenkäytettävyydelle, sillä plastisen muodonmuutoksen ilmetessä kannen voisi sulkea vain kerran, minkä jälkeen sen uudelleenavaaminen vaatisi käytettävyyden kannalta suhteettoman suurta voimaa. /10/

Lommahduksen yhteydessä esiintyvä merkittävä ongelma on rakenteen epälineaarisen muodonmuutuskäyttäytymisen laskennallinen ennustaminen, johon palataan tarkemmin luvussa 2.2.2. Esimerkkinä käyttäytymisen hankalasta ennustettavuudesta voidaan mainita, että vaikka itse ilmiön esitteli jo vuonna 1912 lentokoneinsinööri Hans Reissner, saatiin ensimmäiset laskentamallit rakenteen yksinkertaisesta muodosta huolimatta muodostettua vasta 1930-luvun lopulla ja käytännön testejä vastaaviin laskennallisiin tuloksiin päästiin vasta tietokoneiden laskentatehon kasvaessa 1960-luvulla. /4/

## 2.2 Elementtimenetelmä laskentatyökaluna

Elementtimenetelmä (FEM = Finite Element Method) on 1950-luvulla lentokone-teollisuudessa alkunsa saanut numeerinen menetelmä, jolla pystytään laskennallisesti tarkastelemaan erilaisia fysikaalisia ilmiöitä lukuisilla eri tieteenaloilla. Esimerkkejä elementtianalyysin sovellusalueista ovat muun muassa mekaaniset rakenneanalyysit, termianalyysit, virtausanalyysit ja sähkömagneettisten kenttien tutkimus. Tämän työn puitteissa keskitytään elementtimenetelmän käyttöön rakenneanalyysissä, missä sillä voidaan laskea esimerkiksi muodonmuutoksia, nopeuksia, kiihtyvyyksiä, jännityksiä ja tukireaktioita, tarvittaessa ottaen huomioon myös joitakin ympäristön vaikutuksia, kuten lämpötila. /3/

Ennen elementtimenetelmän kehittämistä yritettiin rakenteita mallintaa matemaattisesti niiden fysikaalista käyttäytymistä kuvaavilla differentiaaliyhtälöillä. Näistä yhtälöistä tuli usein kuitenkin hyvin pitkiä ja monimutkaisia ja muiden kuin kaikkein yksinkertaisimpiin, kuten ympyrän tai neliön muotoisiin, rakenteisiin liittyvien ongelmien ratkaisu osoittautui usein lähes mahdottomaksi. 1800-luvun lopusta alkaen alettiin kehittää menetelmää, jossa monimutkaiset yhtälöt jaettiin pienempiin, yksinkertaisempiin yhtälöihin, joiden ratkaisu oli helpompaa. 1900-luvulla keksittiin jakaa suuret rakenteet, esimerkiksi lentokoneen runko, pienempiin geometrisiin alueisiin, elementteihin, ja luoda jokaiselle alueelle oma, yksinkertainen, sen toimintaa kuvaava yhtälö, minkä jälkeen nämä alueet voitiin jälleen kytkeä yhteen kokonaiseksi kappaleeksi. Käytännössä tämä tapahtuu muodostamalla yksittäisistä elementeistä niin kutsuttu elementtiverkko, joka on elementeistä koostettu kopio alkuperäisen kappaleen muodosta. Tähän elementtiverkkoon kytkeytyy matriisi, joka sisältää elementtiverkon jonkin fysikaalisen ominaisuuden, esimerkiksi jäykkyyden tai lämmönjohtavuuden. Rakenneanalyysien tapauksessa tätä matriisia kutsutaan usein jäykkyydematriisiksi. Tämä jäykkyydematriisi kerrotaan sitten jonkinlaisella kuormitusmatriisilla, vaikkapa voimalla tai lämpötilanmuutoksella, jolloin laskennan tuloksena saadaan rakenteen siirtymät. Rakenneanalyysissä perinteisesti tutkitaan ulkoisten kuormitusten seurauksena syntyviä siirtymiä ja jännityksiä. Elementit siis ovat kuin pieniä matemaattisia rakennuspalikoita, joiden avulla voidaan koota mielivaltaisen muotoisia kokonaisuuksia ja siten simuloida kappaleiden fysikaalista käyttäytymistä. /3/

Elementtimenetelmän etu on sen monikäyttöisyys, sillä kuten kappaleen alussa on kerrottu, sitä voidaan käyttää mitä erilaisimpiin tarkoituksiin. Vielä joitakin kymmeniä vuosia sitten menetelmä oli varsinaisessa hyötykäytössä harvinainen, sillä monimutkaisten rakenteiden analysointi voi vaatia tuhansien rinnakkaisten yhtälöiden ratkaisemista. Tietotekniikan kehitys viime vuosikymmeninä on kuitenkin lisännyt elementtimenetelmän käyttöä räjähdysmäisesti, sillä tietokoneiden laskentatehon lisääntyessä lukuistenkin yhtälöiden yhtäaikaista laskennasta on tullut varsin triviaali operaatio. Menetelmän ympärille on kehitetty lukuisia tietokoneohjelmistoja, rakenneanalyysissä näistä tunnetuimmat ovat ABAQUS, MSC/NASTRAN ja ANSYS, joista viimeistä on käytetty tämänkin työn apuna. /3/

Menetelmää käytettäessä tulee ottaa huomioon, että suoritettaessa matemaattinen rakenneanalyysi, muodostetaan todellisesta rakenteesta ideaalinen laskentamalli, joka ei aina käyttäydy täysin todenmukaisesti. Käytäntö on kuitenkin osoittanut, että oikein toteutettuna malli antaa kuitenkin riittävän hyvän arvion rakenteen todellisesta käyttäytymisestä. Suunnittelijalla on aina lopullinen vastuu laskennan tuloksista, sillä ne voivat vaihdella huomattavasti riippuen käytetystä laskentametodista ja elementtityypeistä, elementtiverkon muodosta ja tiheydestä, kuormitusten ja reunaehtojen määrittämisestä, sekä muista käyttäjästä riippuvista tekijöistä. Suunnitteluohjelmistot eivät myöskään aina osaa huomioida kaikkia olosuhdetekijöitä ja esimerkiksi materiaalissa esiintyviä epätäydellisyyksiä, joten tuloksia tulee lähes poikkeuksetta tarkastella kriittisesti. Vaikka FEM-laskenta on matemaattinen menetelmä, FEM-ohjelmistot ovat nykyisin vakiintuneet esittämään laskennan tulokset graafisessa muodossa. Tällä on hyvät sekä huonot puolensa, sillä tuloksista on helppo saada yleiskuva nopealla silmäyksellä, mutta kuvaan myös monesti luotetaan liikaa käymättä läpi tulosten numeerisia arvoja. /3/

Kaupalliset FEM-ohjelmistot tarjoavat erilaisia analyyseja varten valtavia määriä erilaisia elementtityyppejä, ja oikeanlaisen elementin valinta kuhunkin tilanteeseen saattaa vaikuttaa merkittävästi tulosten tarkkuuteen, sekä laskenta-ajan pituuteen. Lisäksi joidenkin ilmiöiden, kuten kappaleiden välisten kontaktien mallintamiseen soveltuvat vain tiettytyyppiset elementit. Erilaisia elementtityyppejä voidaan yleensä yhdistellä samaan malliin, jolloin voidaan analysoida monimutkaisiakin yhdistettyjä rakenteita. Tämä tekee elementtimenetelmästä hyvin joustavan työkalun, joka soveltuu monipuolisesti erilaisten fysikaalisten ilmiöiden mallintamiseen. Vaikka erilaisia elementtejä voi yhdessä ohjelmassa olla satojakin erilaisia, ne voidaan karkeasti luokitella muutamaankin perustyyppiin. Nämä elementtityypit ovat sauvaelementit, palkkielementit, 2D-solidielementit, laattaelementit, kuorielementit ja 3D-solidielementit, joiden lisäksi eri ohjelmistoista löytyy erilaisia edellä mainittuihin ryhmään sopimattomia erityiselementtejä.

*Sauvaelementit* ovat hyvin yksinkertaisia elementtejä. Ne ovat kaksisolmuisia, tasapaksuja elementtejä, jotka soveltuvat hyvin erilaisten ristikkorakenteiden analysointiin. *Palkkielementit* ovat sauvaelementtien tapaan tasapaksuja ja kaksi-, tai kolmesolmuisia, mutta lisäksi ne pystyvät ottamaan huomioon elementissä vaikuttavan leikkausvoiman ja taivutusmomentin vaikutuksen. Ne soveltuvat erilaisten kehärakenteiden tarkasteluun, minkä lisäksi niitä käytetään mallintamaan muun muassa laatta- ja kuorirakenteiden jäykistepalkkeja.

*2D-solidi-, eli levyelementtien* avulla saadaan analysoitua tasojännityksiä, tasomuodonmuutoksia ja pyörähdysymmetrisiä kappaleita, esimerkiksi erilaisia levyrakenteita, joita tässäkin työssä tutkitaan. Yleisimpiä 2D-solidielementtejä ovat suorasisiviset kolmio- ja neliöelementit, joiden lisäksi voidaan monimutkaisemmissa tapauksissa käyttää kaarevasivuisia kvadraattielementtejä.

*Laattaelementeillä* voidaan käsitellä taivutuksen ja leikkauksen alaisia tasopintarakenteita. Laattaelementit ovat yleensä tasapaksuisia, levyn keskipinnan elementtejä ja niitä on sekä ohuille, että paksuille laatoille, joista jälkimmäiset ottavat huomioon myös

leikkausvoimista aiheutuvan laatan taipuman. Laattaelementtien erikoistapauksia ovat laminaariset elementit, joissa voi olla useampia eri materiaalikerroksia.

*Kuorielementit* ovat laattaelementtien kaltaisia keskipinnan elementtejä, mutta niitä sovelletaan tasojen sijaan kaarevien pintojen analyysihin. Ne ovat useasti suorapintaisia ja kaarevan pinnan muoto saadaan mallinnettua käyttämällä riittävän paljon pieniä elementtejä. Myös kaarevia kuorielementtejä voidaan käyttää, mutta niiden laskenta on suoraa elementtejä raskaampaa. Myös kuorielementeistä on olemassa sekä ohuen, että paksun kuoren elementtejä, joista edelleen jälkimmäiset huomioivat leikkausvoimien vaikutuksen siirtymiin.

*3D-solidielementit* sopivat monimutkaisten, kolmiulotteisten kappaleiden analyysihin. Ne voivat olla suora- tai kaarevapintaisia neli-, viisi-, tai kuusitahokkaita, ja niiden laskenta voi olla huomattavastikin yksinkertaisia elementtityyppejä raskaampaa.

*Erityiselementteihin* lukeutuu mitä moninaisimpia elementtejä, joita ei voida luokitella mihinkään tiettyyn ryhmään. Nämä ovat yleensä luotu jonkin tietyn ilmiön tarkasteluun, mikä ei perinteisillä elementtityypeillä olisi mahdollista. Erityiselementtejä voivat olla esimerkiksi pintojen välisiä kontakteja mallintavat elementit ja särön kärkeä kuvaavat elementit.

Kunkin elementtityypin tehokas käyttö edellyttää taustalla olevaan lujuusopilliseen teoriaan, sekä elementtimenetelmän teoriaan perehtymistä. Eri elementtityypeillä on tiettyjä rajoituksia ja niihin sisältyy oletuksia, joilla on vaikutusta analyysin käsittelyyn ja tulosten tulkintaan. FEM-ohjelmistot antavat käyttäjälleen mahdollisuuden käyttää jatkuvasti uudentyyppisiä elementtityyppejä ilman perehtymistä niiden teoriaan ja toimintaan, mikä usein johtaa epätarkkoihin analyysihin ja virheellisiin tuloksiin. Tästä syystä ennestään tuntemattomia elementtityyppejä käytettäessä olisi hyvä ensin tutustua niiden ominaisuuksiin. /12/

## 2.2.1 Lineaarinen ja epälineaarinen elementtimenetelmä

Jotta voitaisiin tutustua epälineaarisen elementtimenetelmän laskennallisiin taustoihin edes pintapuolisesti, on aluksi luotava katsaus lineaarisen laskennan teoriaan. Kuten edellisessä kappaleessa mainittiin, perustuu elementtimenetelmällä toteutettava rakenneanalyysi niin kutsuttujen jäykkyysmatriisien muodostamiseen. Elementin jäykkyysmatriisi ottaa huomioon materiaaliominaisuudet, jolloin elementit muuttavat muotoa realistisesti kuormitustilanteessa. Yksittäisten elementtien jäykkyysmatriiseista kootaan rakenteelle ominainen kokonaisjäykkyysmatriisi, joka rakenneanalyysissä tyypillisesti kuvaa rakenteeseen kohdistuvien ulkoisten voimien ja siinä tapahtuvien geometristen siirtymien välistä yhteyttä. /4/

Jokainen yksittäinen elementti on kytköksissä viereisiin elementteihin niin kutsuttujen solmujen välityksellä. Kun todellisesta rakenteesta muodostetaan matemaattista mallia, tulee jokaiselle elementille aluksi määrittää näihin solmuihin kohdistuvien voimien ja niiden aiheuttamien siirtymien välinen lineaarinen yhteys:

$$\mathbf{R}_e = \mathbf{k}_e \mathbf{q}_s \quad (7)$$

Missä

$\mathbf{R}_e$  = Vektori joka kuvaa elementin solmuihin kohdistuvia voimia

$\mathbf{k}_e$  = Elementin jäykkyysmatriisi

$\mathbf{q}_s$  = Vektori joka kuvaa elementin solmupisteiden siirtymiä

Kun jäykkyysmatriisit rakenteen yksittäisille elementeille on määritetty, voidaan ne yhdistää kokonaiseksi rakenteeksi. Tämä tapahtuu kytkemällä vierekkäisten elementtien solmut yhteen niin, että niiden väliset jatkuvuus- ja tasapainoehdot täyttyvät jolloin muodonmuutokset etenevät rakenteessa todenmukaisesti. Elementtien yhdistämisen jälkeen kokonaisen rakenteen käyttäytymistä kuvaava yhtälö voidaan esittää muodossa:

$$\mathbf{R}_r = \mathbf{K}_r \mathbf{q}_r \quad (8)$$

Missä

$\mathbf{R}_r$  = Vektori joka kuvaa rakenteeseen kohdistuvia ulkoisia voimia

$\mathbf{K}_r$  = Rakenteen kokonaisjäykkyysmatriisi

$\mathbf{q}_r$  = Vektori joka kuvaa rakenteen solmupisteiden siirtymiä

Kokonaisjäykkyysmatriisin muodostamiseen on olemassa erilaisia laskennallisia menetelmiä joiden kunkin käytännöllisyys riippuu kyseessä olevasta ongelmasta. Näihin menetelmiin ei kuitenkaan tämän esityksen yhteydessä paneuduta syvällisemmin. Kun kokonaisjäykkyysmatriisi on saatu muodostettua, voidaan siihen soveltaa jäykän kappaleen liikeilat eliminoivia reunaehtoja, mikä kytkee kappaleen vapaat reunat paikalleen halutulla tavalla. Tämän jälkeen solmupisteiden siirtymät saataisiin periaatteessa määritettyä jäykkyysmatriisin käänteismatriisista eli niin kutsutusta joustomatriisista:

$$\mathbf{q}_r = \mathbf{K}_r^{-1} \mathbf{R}_r \quad (9)$$

Tästä saadaan laskettua myös rakenteen sisäiset jännitykset, sillä solmupisteiden siirtymää kuvaavasta matriisista  $\mathbf{q}_r$  saadaan selville elementeissä tapahtuneet muodonmuutokset. Käytännössä tätä käänteismatriisia ei koskaan lasketa, sillä se on laskennallisesti kallista. Tästä johtuen yhtälön ratkaisemiseen on kehitetty muita vaihtoehtoisia menetelmiä.

*Periaatteen soveltaminen geometrisesti epälineaarissa analyysissä*

Yllä kuvatun jäykkyyismatriisin käytön periaatetta on vuosien kuluessa kehitetty eteenpäin niin, että sitä voidaan soveltaa myös muissa kuin vain lineaarisesti käyttäytyvissä muodonmuutoksissa. Jotta jäykkyyismatriisia voitaisiin käyttää geometrisesti epälineaarisissa tilanteissa joissa kuormituksen lisääntyessä tapahtuu esimerkiksi suuria muodonmuutoksia, täytyy jäykkyyisyhtälö (8) ensin muuttaa sopivaan muotoon. Tällaisessa tapauksessa jäykkyyismatriisi  $\mathbf{K}_r$  muuttuu elementtiverkossa tapahtuvien solmusiirtymien  $\mathbf{q}_r$  funktiona ja yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r)\mathbf{q}_r = \mathbf{R}_r \quad (10)$$

Tällaisen yhtälön ratkaisemiseksi voidaan soveltaa paloittaista lineaarisointia. Tällöin kuormitus  $\mathbf{R}_r$  kohdistetaan elementtiverkkoon askeleittain niin kutsuttuina inkrementteinä. Jokaista inkrementaalista kuormitusaskelta  $\Delta\mathbf{R}_r$  vastaa muodonmuutos  $\delta\mathbf{q}_r$ , jolloin kaava (10) voidaan esittää muodossa:

$$[\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r + \delta\mathbf{q}_r)][\mathbf{q}_r + \delta\mathbf{q}_r] = [\mathbf{R}_r + \Delta\mathbf{R}_r] \quad (11)$$

Yllä olevaan yhtälöön voidaan sijoittaa seuraava approksimaatio:

$$[\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r + \delta\mathbf{q}_r)] = [\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r)] + [\delta\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r, \delta\mathbf{q}_r)] \quad (12)$$

Jolloin yhtälö (11) saadaan muotoon:

$$\begin{aligned} & [\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r)][\mathbf{q}_r] + [\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r)][\delta\mathbf{q}_r] + [\delta\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r, \delta\mathbf{q}_r)][\mathbf{q}_r] + [\delta\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r, \delta\mathbf{q}_r)][\delta\mathbf{q}_r] \\ & = [\mathbf{R}_r + \Delta\mathbf{R}_r] \end{aligned} \quad (13)$$

Kun tästä yhtälöstä (13) vähennetään yhtälö (8), saadaan aikaan ns. inkrementaalinen jäykkyyisyhtälö:

$$[\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r)][\delta\mathbf{q}_r] + [\delta\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r, \delta\mathbf{q}_r)][\mathbf{q}_r] + [\delta\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r, \delta\mathbf{q}_r)][\delta\mathbf{q}_r] = [\Delta\mathbf{R}_r] \quad (14)$$

Yllä olevaan yhtälöön (14) voidaan (Backus/Mellon mukaan) sijoittaa seuraava lauseke:

$$[\delta\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r, \delta\mathbf{q}_r)]\{\mathbf{q}_r\} = [\mathbf{G}(\mathbf{q}_r)]\{\delta\mathbf{q}_r\} + [\delta\mathbf{G}(\mathbf{q}_r, \delta\mathbf{q}_r)]\{\delta\mathbf{q}_r\} \quad (15)$$

Sijoituksen jälkeen yhtälö (14) voidaan linearisoida, jolloin se yksinkertaistuu ns. yleiseksi inkrementaaliseksi jäykkyyisyhtälöksi:

$$[\mathbf{K}_r(\mathbf{q}_r) + \mathbf{G}(\mathbf{q}_r)]\{\delta\mathbf{q}_r\} = [\Delta\mathbf{R}] \quad (16)$$

Tässä

$\mathbf{K}_r(q_r)$  = Siirtymäjäykkyysmatriisi, laskettuna siirtymän arvolla  $q_r$

$\mathbf{G}_r(q_r)$  = Niin kutsuttu geometrinen jäykkyysmatriisi, joka riippuu siirtymistä ja siirtymän  $q_r$  hetkellä vaikuttavista sisäisistä voimista

Käyttämällä yllä olevaa yhtälöä (16), voidaan epälineaarinen ongelma ratkaista sarjana pieniä lineaarisia ongelmia. Jokaiselle kuormitusaskelelle lasketaan uudet  $\mathbf{K}(q_r)$  ja  $\mathbf{G}(q_r)$ , käyttäen laskennan perusteena tarkasteltavaa geometriaa, materiaaliominaisuuksia ja kunkin kuormitusaskelen alussa vaikuttavia sisäisiä voimia. Kuormitusta kasvatetaan sitten askel kerrallaan, jolloin saadaan laskettua kunkin askelen muodonmuutos ja tästä seuraavat sisäiset jännitykset. Lopulliset arvot muodonmuutoksen ja sisäisten jännitysten suuruudelle saadaan laskettua näiden inkrementaalisten kuormitusaskelien summana. On huomionarvoista, että kuormitustilanteen alussa  $\mathbf{G}(0)=0$ , sillä geometrinen jäykkyysmatriisi on suoraan verrannollinen rakenteen sisäisiin voimiin, joiden suuruus ennen ensimmäistä kuormitusaskelta on nolla. Menetelmä on useimmiten riittävän tarkka epälineaarisesti käyttäytyvän rakenteen muodonmuutosten ja jännitysten simulointiin. Mitä suurempaa tarkkuutta tilanne vaatii, sitä pienempiä yksittäisiä kuormitusaskeleita voidaan käyttää. Tällöin kuormitusaskelten määrä kuitenkin kasvaa, mikä taas pidentää laskennan vaatimaa aikaa.

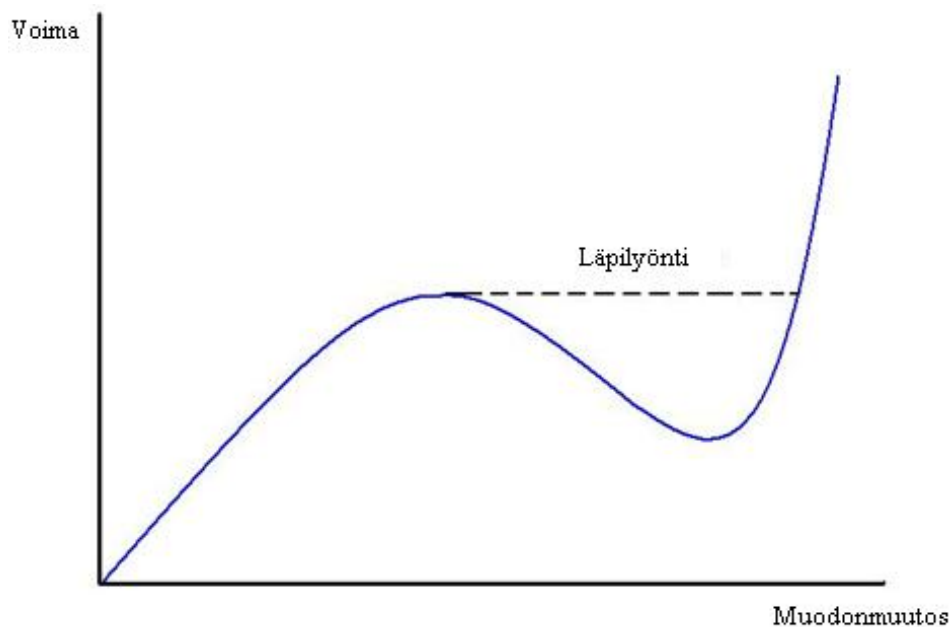
Tämä yllä kuvattu menetelmä, jossa suurta epälineaarista muodonmuutosta approksimoidaan sarjalla pienempiä lineaarisia analyyseja, on alun perin kehitetty lentokoneteollisuudessa. Ensimmäisen kerran sen esitteli tutkija M. J. Turner vuonna 1960. /4/

## 2.2.2 Epälineaarisen elementtianalyysin numeeriset menetelmät

Epälineaarisella rakenneanalyysillä voidaan tarkastella tilanteita, joissa ongelman ratkaisu ei käyttäydy lineaarisesti, esimerkiksi kappaleen muodonmuutos ei muutu samassa suhteessa siihen vaikuttaviin voimiin nähden. Epälineaarisuus voidaan karkeasti jakaa kolmeen eri tyyppiin: *geometriseen epälineaarisuuteen*, *materiaalin epälineaarisuuteen* ja rakenneosien välisiin *kontakteihin*. Geometrista epälineaarisuutta voi esiintyä, mikäli rakenteessa tapahtuu suuria siirtymiä kuormitusta lisättäessä. Tästä hyvä esimerkki on kappaleessa 2.1 esitelty jousitettu palkki. Materiaalisen epälineaarisuuden tapauksessa materiaalin myötäminen on esimerkiksi aluksi nopeaa, mutta hidastuu kuormaa kasvatettaessa, tai toisinpäin. Tällaista käyttäytymistä voi esiintyä joillakin muokkauslujittuvilla materiaaleilla. Materiaalin epälineaarisuudessa voi olla kyse myös tilanteesta, jossa muodonmuutos etenee kimmoiselta alueelta plastiselle ja rakenteeseen syntyy pysyviä muodonmuutoksia. Kontakteilla tarkoitetaan rakenneosien välisiä liitoskohtia tai rakoja, joiden yli muodonmuutos ei pääse etenemään tasaisesti, esimerkiksi jos rakenteen osat pääsevät liikkumaan toistensa suhteen. Tällöin tilanteen mallintamisessa tulee käyttää erityisiä kontaktielementtejä /3/

Käsittelyssä olevassa läpilyönti-ilmiössä on nimenomaan kyse geometrisestä epälineaarisuudesta. Siinä voimaa kasvatettaessa muodonmuutos etenee rakenteessa lineaarisesti, kunnes saavutetaan kriittinen lommahduskuormitus jolloin rakenne kokee äkilli-

sen, suuren muodonmuutoksen pienellä kuorman muutoksella. Tällaista tilannetta havainnollistaa kuvassa 2.6. nähtävä läpilyöntilommahtamisen voima-muodonmuutoskäyrä. Tästä käyrästä voidaan nähdä, kuinka voima ja muodonmuutos kasvavat aluksi lähes lineaarisesti samassa suhteessa. Muodonmuutoksen edetessä systeemin käyttäytyminen alkaa muuttua selvemmin epälineaariseksi, joka näkyy käyrän loivenemisena. Lopulta käyrä kääntyy alaspäin, jolloin muodonmuutoksen eteneminen vaatiiikin vähemmän voimaa, kuin millä tähän tilanteeseen on päästy. Käytännössä tämä tarkoittaa läpilyöntilommahtuksen alkamista ja tehtävän muuttumista dynaamiseksi. Mikäli voimaa tämän jälkeen kasvatetaan tai pidetään vakiona, muodonmuutos etenee nopeasti seuraavaan tasapainoasemaan, jossa ulkoinen voima ja kappaleen sisäisten jännitysten synnyttämät voimat jälleen kumoavat toisensa. /3/



**Kuva 2.6.** Systeemin tasapainopolun kulku läpilyönnin tapahtuessa. /3/

Geometrisesti epälineaarisen ongelman tarkasteluun on olemassa erilaisia numeerisia menetelmiä, joiden avulla voidaan selvittää tasapainopolun kulku. Rakenteen tasapainotilaa selvittäessä voidaan laskentaa helpottaa määrittämällä kuormitustilanteelle referenssikuormituskentät, joiden suuruutta kasvatetaan kuormakertoimen  $\lambda$  avulla. Joitakin käytettyjä menetelmiä ovat muun muassa *Newton-Raphson*-iterointi, *modifioitu Newton-Raphson*-iterointi ja *Kaarenpituusmenetelmä*. Yhteistä näille kaikille menetelmille on, että rakenteen epälineaarista muutosta approksimoidaan sarjalla pieniä lineaarisia muutoksia eli inkrementtejä. Kaikissa kolmessa menetelmässä päämääränä on selvittää systeemin tasapainotilan muuttuminen seuraamalla kuvan 2.6. kaltaista tasapainopolkua. Kaikkien kolmen menetelmän taustana toimii mielivaltaisen rakenteen statiikan epälineaarinen tasapainoyhtälö, joka voidaan johtaa virtuaalisen työn yhtälöstä. /8/



### *Tasapainopolun määrittely*

Pajusen /8/ mukaan elementtimenetelmän ajatus on jakaa tarkasteltava domeeni osiin, eli elementteihin ja interpoloida jokaisen elementin sisällä tuntematonta siirtymäkenttää muotofunktioiden ja solmusiirtymien avulla. Pajunen on esitellyt epälineaarisen tasapainoyhtälön johdon yksityiskohtaisesti, mutta tässä yhteydessä tyydytään toteamaan että *elementtimenetelmällä diskretoituneen mielivaltaisen rakenteen statiikan tehtävän epälineaarinen tasapainoyhtälö* voidaan johtaa virtuaalisen työn yhtälöstä ja esittää muodossa:

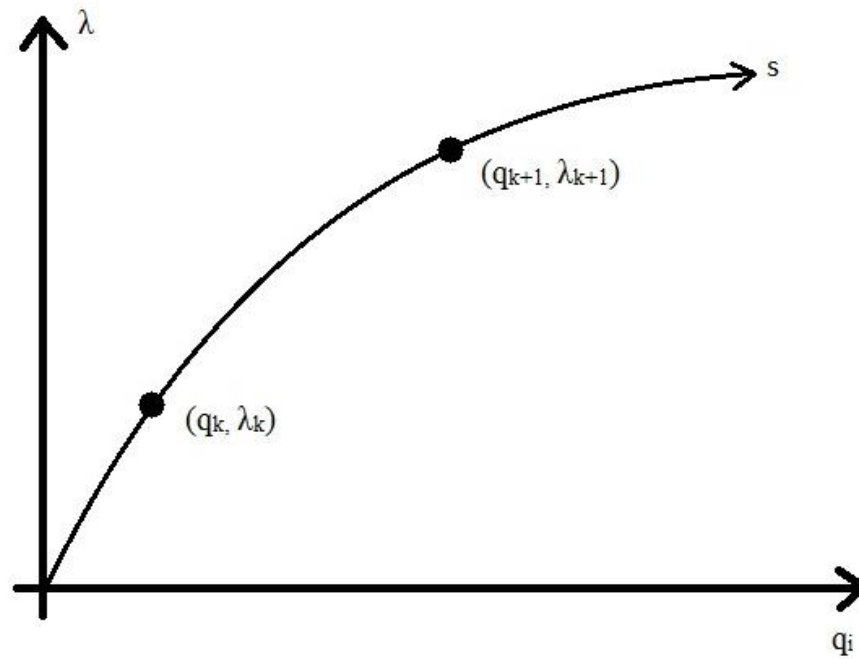
$$\mathbf{r}(\mathbf{q}) - \lambda \mathbf{p}_{ref} = \mathbf{0} \quad (17)$$

Tässä

$\mathbf{r}$  = solmusiirtymien  $q_i$  funktiona muodostettava sisäisten voimien vektori

$\lambda \mathbf{p}_{ref}$  = ulkoisten kuormien vektori

Kuten yhtälöstä nähdään, rakenteen ollessa tasapainossa tulee sisäisten voimien ja ulkoisten kuormien olla yhtä suuret. Yhtälössä  $\mathbf{p}_{ref}$  on etukäteen määritetty vakio referenssikuormitusvektori, jota kasvatetaan kuormituskertoimella  $\lambda$ . Koska tasapainoyhtälö (17) on epälineaarinen, voidaan se ratkaista askeleittain joukkona lineaarisia laskutoimituksia. Tapausta voidaan havainnollistaa kuvan 2.7. avulla, jossa näkyy tasapainopolun kulku  $(\mathbf{q}, \lambda)$  – avaruudessa. /8/



**Kuva 2.7.** Tasapainopolun kulku  $(q, \lambda)$  – avaruudessa. /8/

Tasapainopolun määrittämisessä halutaan tietää tunnetusta tasapainotilasta  $(q_k, \lambda_k)$  polun pisteeseen  $(q_{k+1}, \lambda_{k+1})$  pääsemiseksi vaadittavat inkrementit  $\Delta q_k$  ja  $\Delta \lambda_k$ . Näiden inkrementtien löytämiseksi linearisoidaan tasapainoyhtälö muotoon:

$$\mathbf{r}_k + \Delta \mathbf{r}_k - (\lambda_k \mathbf{p}_{ref} + \Delta \lambda_k \mathbf{p}_{ref}) = 0 \quad (18)$$

Tässä

$$\Delta(\cdot) = \frac{d(\cdot)}{ds} \Delta s$$

$s$  = tasapainopolkua pitkin kulkeva koordinaatti

### Newton-Raphson-menetelmä

Newton-Raphson-menetelmää on hyödynnetty polynomiyhtälöiden juurien numeerisessa ratkaisemisessa jo kauan ja epälineaarissa rakenneanalyysissä sitä, kuten muitakin tässä esiteltäviä menetelmiä, käytetään tasapainopolun paloittaiseen ratkaisuun. Menetelmä on toimivin tilanteessa, jossa ongelman ratkaisuna saatava tasapainopolku on monotonisesti nouseva ohjausparametrina käytettävän kuormakertoimen suhteen. Tasapainopolulla edetään tällöin antamalla kuormakertoimelle tunnettuja inkrementtejä  $\Delta\lambda_i$ . Koska kuormakertoimen inkrementti on tunnettu, voidaan linearisoitu tasapainoyhtälö (18) lyhentää:

$$\Delta \mathbf{r}_k = \lambda_{k+1} \mathbf{p}_{ref} - \mathbf{r}_k \quad (19)$$

Pajunen muokkaa yhtälön muotoon:

$$\mathbf{K}_T \Delta \mathbf{q}_k = \lambda_{k+1} \mathbf{p}_{ref} - \mathbf{r}_k \quad (20)$$

Jossa

$\mathbf{K}_T$  = Niin kutsuttu tangenttijäykkyysmatriisi, joka koostuu siirtymäjäykkyysmatriisista ja geometrisesta jäykkyysmatriisista

Lineaarinen yhtälö (20) voidaan ratkaista Newton-Raphson-iteroinnilla:

$$\mathbf{K}_T d\mathbf{q}_k^i = \lambda_{k+1} \mathbf{p}_{ref} - \mathbf{r}_k^i \quad (21)$$

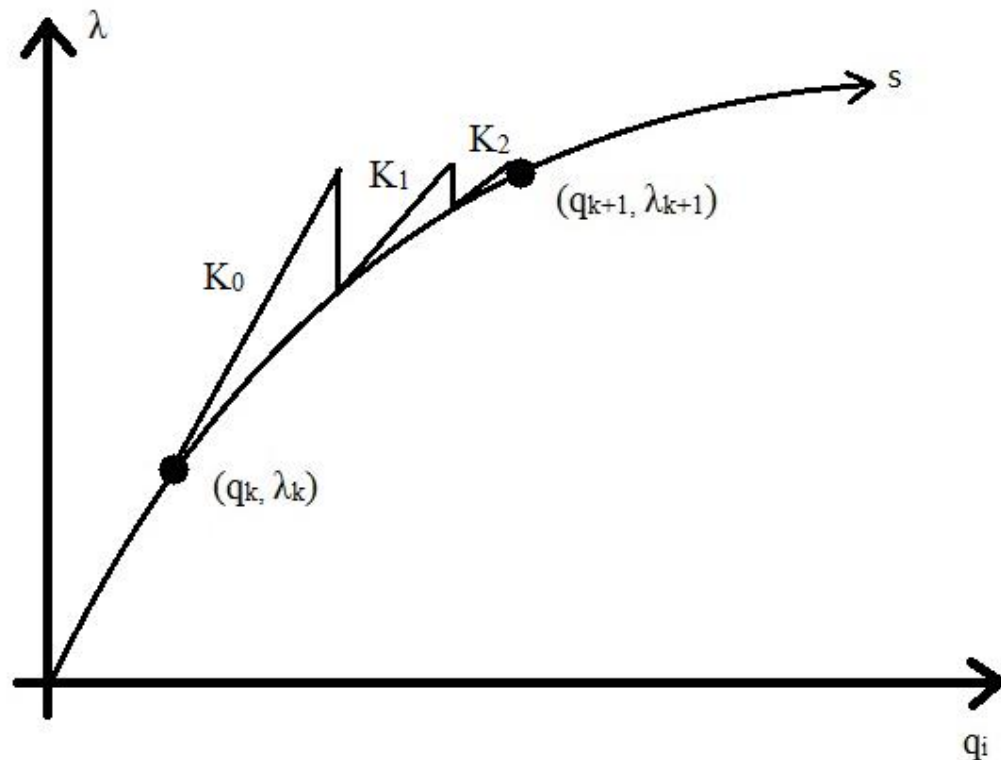
Yläindeksillä merkitään tässä iteraatiokierrosta. Yhtälön supennut ratkaisu on:

$$\Delta \mathbf{q}_k = \sum_i d\mathbf{q}_k^i \quad (22)$$

Tasapainopolun seuraava piste voidaan tällöin esittää muodossa:

$$(\mathbf{q}_{k+1}, \lambda_{k+1}) = (\mathbf{q}_k + \Delta \mathbf{q}_k, \lambda_k + \Delta \lambda_k) \quad (23)$$

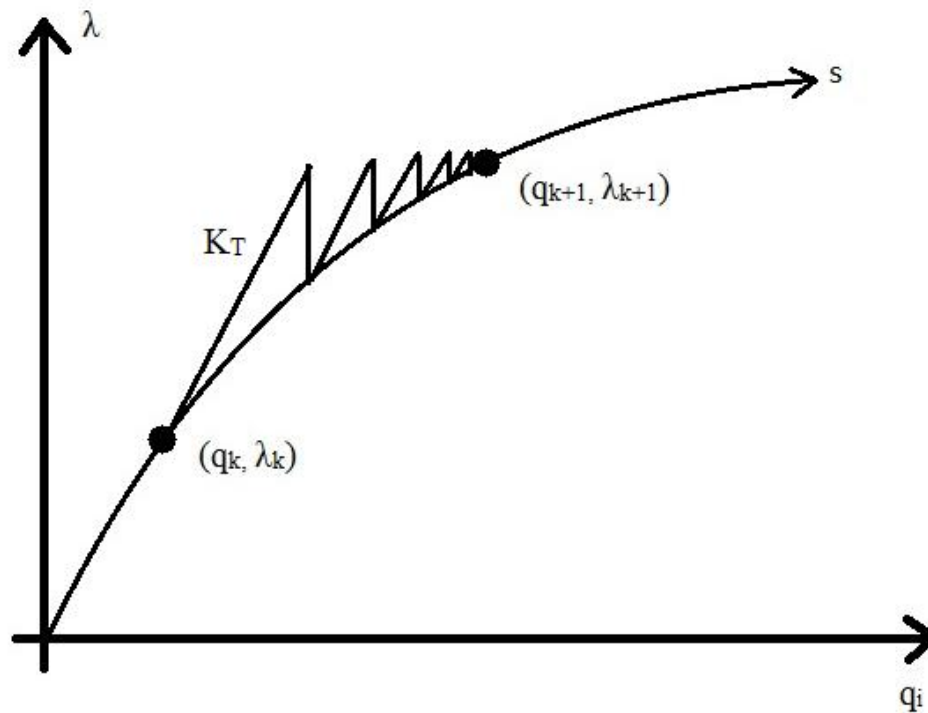
Mikäli tangenttijäykkyysmatriisi päivitetään uudelleen jokaista iteraatiokierrosta varten, menetelmää kutsutaan tädeksi Newton-Raphson-menetelmäksi. Ratkaisun kulkua on havainnollistettu kuvassa 2.8. /8/



**Kuva 2.8.** *Newton-Raphson-iteraation ratkaisun kulku /8/*

#### *Modifioitu Newton-Raphson-menetelmä*

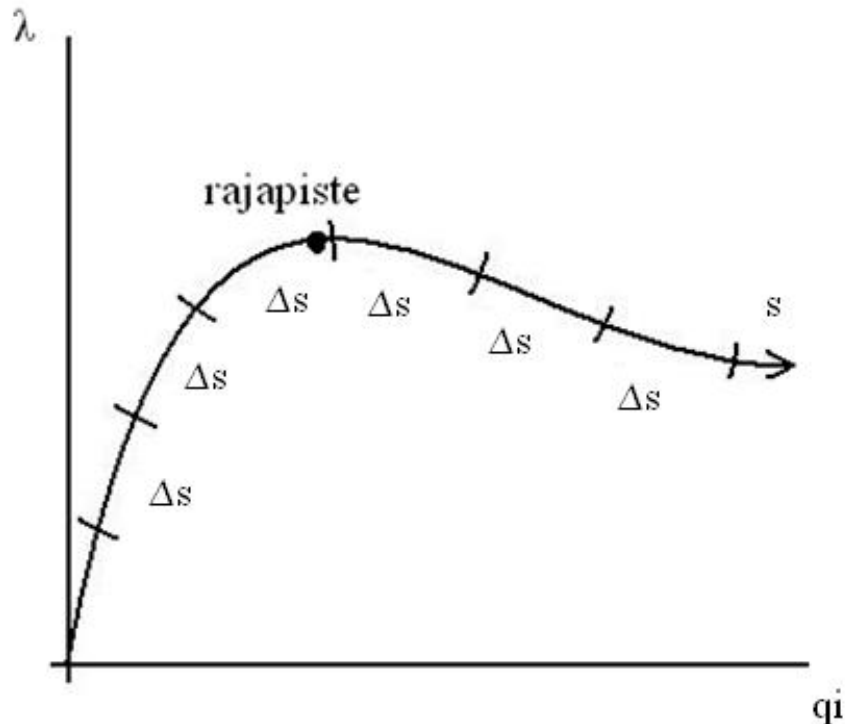
Perinteisessä Newton-Raphson iteraatiossa tangenttijäykkymatriisin päivittäminen uudelleen jokaista iteraatiokierrosta varten on laskennallisesti raskasta ja hidasta. Tämän raskaan laskutoimituksen eliminoimiseksi analyysistä on kehitetty niin kutsuttu modifioitu Newton-Raphson menetelmä, jossa jäykkymatriisi  $K_T$  pysyy muuttumattomana analyysin alusta loppuun. Ratkaisun kulkua havainnollistaa kuvaaja 2.9. Kuten kuvasta voidaan havaita, tällainen ratkaisumenetelmä vaatii analyysiltä suuremman määrän iteraatiokierroksia vastaavan tarkkuuden saavuttamiseksi. Jäykkymatriisin päivittämiseltä välttyminen voi tietyissä tapauksissa kuitenkin nopeuttaa ratkaisun laskentaa niin paljon, että sillä saavutettava hyöty on merkittävästi suurempi, kuin iteraatiokierrosten lukumäärän kasvattamisesta koituva haitta. /8/



**Kuva 2.9.** Modifioidun Newton-Raphson-iteraation ratkaisun kulku /8/

### *Kaarenpituusmenetelmä*

Usein käytännön tehtävissä, kuten tämänkin työn kannalta keskeisessä rakenteen stabiilisuustarkastelussa tulee vastaan tilanne, jossa epälineaarisen tasapainoyhtälön (17) ratkaisupolku kääntyy kuvan 2.10. mukaisesti alaspäin. Tällöin polku ohittaa niin sanotun rajapisteen ja kuormakerroin  $\lambda$  saavuttaa lokaalin maksimiarvon. Tällaisen tasapainopolun ratkaiseminen Newton-Raphson-iteraatiota käyttämällä on ongelmallista, sillä kuten edellä todettiin, se käyttää kuormakerrointa polun ohjausparametrina. Kuvatuslaisessa tilanteessa on löydettävä jokin vaihtoehtoinen ohjausparametri, jonka tulisi kasvaa tasaisesti kuormitushistorian alusta loppuun. Tällöin voidaan ottaa käyttöön niin kutsuttu *kaarenpituusmenetelmä*, jossa ohjausparametrina käytetään ratkaisupolkua pitkin kulkevaa koordinaattia  $s$ . Koordinaattia kasvatetaan inkrementeillä joilla ei ole suoranaista fysikaalista tulkintaa, vaan ne merkitsevät tasapainopolulla edettyä matkaa kuvan 2.10. mukaisessa  $(q, \lambda)$ -avaruudessa.



**Kuva 2.10.** Tasapainopolun selvittäminen kaarenpituusmenetelmässä.

### 2.2.3 Lommahdusongelman ratkaisu Ansys-ympäristössä

Kuten edellä on mainittu, rakenne voi muuttua epästabiiliksi kun kuormitus ylittää kriittisen nurjahdusrajan. Toisenlainen tilanne, jossa epästabiilisuutta voi esiintyä, ilmenee, mikäli epälineaarisesti käyttäytyvät materiaali muuttuu epästabiiliksi. Tällaisissa tapauksissa voi olla vaikeaa saada ratkaisua konvergoitumaan perinteisin laskentamenetelmin, jolloin käyttöön on otettava jokin epälineaarinen menetelmä. Lommahduksen tapauksessa on nimenomaan kyse epästabiilista rakenteellisesta ongelmasta, jonka ratkaisuun tässä työssä käytettävä Ansys tarjoaa kolme eri vaihtoehtoa:

- Kaarenpituusmenetelmä
- Epälineaarinen stabilointi
- Ongelman käsittely hitaasti etenevänä dynamiikan ongelmana

Jo edellä esitelty kaarenpituusmenetelmä soveltuu globaalisti epästabiilien ongelmien käsittelyyn, esimerkiksi juurikin levyn ”Snap-through” – tyyppinen lommahtaminen eli läpilyönti. Kaarenpituusmenetelmällä on Ansys – ympäristössä huomattavia rajoituksia. Tiivistettynä menetelmän rajoituksista voidaan mainita, että sitä ei voi käyttää yhdessä epälineaaristen materiaalien kanssa, sillä ei pystytä määrittämään ratkaisua paikallisille epästabiiliusongelmille, sitä voidaan soveltaa vain staattiseen rakenneanalyysi-

siin ja se asettaa tarkat ehdot analyysissä käytetyille kuormituksille. Kaarenpituusmenetelmän käyttö sulkee myös pois mahdollisuuden käyttää monia muita Ansysin tarjoamia työkaluja, sillä sen sopii huonosti yhteen muiden laskenta-algoritmien kanssa. Kaarenpituusmenetelmän huomattava etu on sen kyky havaita voima-siirtymä-käyrästä myös sellaiset osuudet joilla kulmakerroin muuttuu negatiiviseksi. Tämän on hyödyllistä erityisesti läpilyönti-ilmiön tapauksessa jossa käyrä tyypillisesti kääntyy alaspäin, kuten nähdään kuvasta 2.6.

Epälineaarinen stabilointi on käytännöllinen työkalu kaikenlaisten epästabiilisuusongelmien ratkaisuun. Menemättä tarkemmin menetelmän taustalla vaikuttavaan matematiikkaan, voidaan todeta että epälineaarinen stabilointi on numeerinen työkalu, joka on hyvin yhteensopiva lähes kaikkien epälineaariseen analyysiin liittyvien toimintojen, kuten esimerkiksi automaattisen askeleenpituuden säädön kanssa. Menetelmän ainoa huono puoli on sen kaarenpituusmenetelmää heikompi kyky paikantaa ratkaisu alaspäin kääntyvän tasapainokäyrän tapauksessa..

Kolmas vaihtoehto epästabiilin ongelman ratkaisuun on käsitellä ongelmaa staattisen analyysin sijaan hitaasti etenevänä dynamiikan ongelmana. Tällöin ongelman konvergoitumista yritetään ennustaa sen dynaamisten ominaisuuksien perusteella. Menetelmä on suhteellisen monimutkainen, sillä erilaisesta analyysityypistä johtuen ongelman määrittely hankaloituu ja käyttäjältä vaaditaan systeemistä sellaisia tietoja, joilla ei staattisessa ongelmassa ole merkitystä, kuten erilaisia aikaintegraatioparametreja. Tästä johtuen Ansysissä suositellaankin epästabiilin ongelman ilmetessä ensin kokeilemaan kahta ensimmäistä menetelmää. /11/

### 3 OLEMASSA OLEVIEN KANSIKONSTRUKTI- OIDEN ANALYSOINTI

Metalpak Oy:n nykyisessä tuotekannassa maalipurkit varustellaan pääasiassa yhdellä kolmesta mahdollisesta kansityypistä. Ensimmäinen näistä on korvakekansi, joka suljetaan koneellisesti ja avataan tavallisesti nostamalla kannessa olevat korvakkeet ylös yksitellen käyttämällä apuna esimerkiksi ruuvimeisseliä. Toinen kansityyppi on painokansi, joka painetaan suurella voimalla kiinni purkin suuhun, ja väännetään auki pitkävartisen työkalun avulla. Kolmas kansi on vannepainokansi, jolle on olemassa kaksi kiinnitysvariaatiota. Kansi voidaan kiinnittää purkkiin joko uudelleenkäytettävällä käsisalpalpavanteella, tai kertakäyttöisellä L-profiilivanteella. Eri kansityypeistä korvakekansi ja vannepainokansi ovat asennettavissa samanlaisiin maalipurkkeihin, mutta painokansi vaatii omanlaisensa purkin.

Kansien tiivistemateriaalit ovat käyttökohteesta riippuen joko pvc- tai luonnonkumipohjaisia. Tiiviste asennetaan tavallisesti ruiskuttamalla nestemäinen tiivistemateriaali kannen tiivisteuraan, jonka jälkeen se jähmetetään paikalleen kuumentamalla kansi uunissa. Koko kappaleen kolme lähteenä ovat olleet itse otetut valokuvat yrityksen tuotteista, henkilökunnan kanssa käydyt keskustelut ja purkeille suoritettut empiiriset testit.

#### 3.1 Korvakekansi

Ensimmäisenä tuotevalikoiman kansista käsitellään perinteinen, yli yhden litran maalipurkeissa käytetty, korvakekansi. Tämä useimmille maalareille tuttu kansityyppi on ollut käytössä pitkän aikaa, ja vaikka sen toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen, on sillä silti omat heikkoutensa. Kannen avaaminen ja sulkeminen perustuu sen nimen mukaisesti kantta ympäröiviin korvakkeisiin. Ne painetaan tiukasti purkin yläreunassa olevaa pyöristystä vasten jolloin kansi pysyy kiinni purkissa ja kannen sisäpinnan urassa oleva tiivisterengas puristuu purkin reunaa vasten sinetöiden purkin ilmatiiviiksi. Kun maali purkitetaan tehtaalla, suljetaan purkki ensimmäisen kerran koneellisesti sellaiseen tiukkuuteen, että sen avaaminen ilman jonkinlaista työkalua on hyvin vaikeaa. Tämä on ensimmäinen ongelma, sillä asiakastutkimusten mukaan maalarit toivoisivat mahdollisuutta avata kansi paljain käsin, koska sopivaa työvälinettä ei aina ole käden ulottuvilla. Erityisesti tämä heikkous korostuu tilanteissa joissa maalaaminen tapahtuu hankalassa ympäristössä, esimerkiksi jonkinlaisilla rakennustelineillä tai korkeissa paikoissa, missä maalarin voisi toivoa avaavansa purkin yhdellä kädellä samalla kun pitää toisella kädellä kiinni turvarakenteista. Käytännössä maalarit käyttävät purkin avaamiseen esimerkiksi



ruuvimeisseliä, tai vastaavaa pitkän vipuvarren tarjoavaa apuvälinettä ja purkin avaamiseen on lähes poikkeuksetta käytettävä kahta kättä. Maalipurkin avaaminen ei myöskään ole täysin turvallista, sillä turvaohjeista huolimatta monet maalarit käyttävät purkin avaamiseen ruuvimeisselin ohella toisinaan teräaseita, esimerkiksi puukkoja, jolloin työkalun lipsahtaminen tai terän kärjen katkeaminen voi aiheuttaa huomattavia vaaratilanteita. Näistä seikoista johtuen kehitystyössä pyritään luomaan kansirakenne, joka olisi mahdollista avata helposti ilman erillisiä työvälineitä.. Kansityypin koneellisesta suljennasta aiheutuu myös maalin purkittajalle lisäkustannuksia, sillä toiminnon automatisointi vaatii erillisen suljentalaitteen, joka puristaa kannen korvakkeet samanaikaisesti kiinni joka puolelta. Jokainen kansikoko vaatii oman, sille mitoitettun laitteen, mikä tulee ottaa huomioon valmistuslinjalla, joten jo kannen sulkemiskoneiston suunnittelussa on omat haasteensa. Hyvänä puolena korvakekansityypistä voidaan mainita, että avaaminen on selkeää heti ensimmäisellä kerralla, eikä sen ymmärtämiseksi vaadita erillistä perehtymistä.

Toisena kansityypin heikkoutena voidaan mainita sen tiiviys uudelleen suljettaessa. Maalarilla ei luonnollisestikaan ole käytettävissä maalitehtaan sulkemiskoneeseen rinnastettavaa laitetta kannen uudelleensuljentaa varten, mistä johtuen purkin saaminen uudestaan tiiviiksi on erittäin hankalaa. Sormivoimin korvakkeiden saaminen tiiviyn edellyttämään tiukkuuteen on lähes mahdoton tehtävä, ja vaikka korvakkeiden sulkeminen onkin mahdollista yksitellen asianmukaisilla pihdeillä tai vastaavalla puristustyökalulla, on se varsin epäkäytännöllistä. Maalarit ovat kehittäneet omia systeemeitään kannen tiivistämiseksi esimerkiksi purkin ja kannen väliin sijoitettavan muovikelmun avulla, mutta edelleenkin tämä ei ole tarkoituksenmukaista ja kehitystyön tavoitteena onkin muun muassa päästä eroon kuvatus kaltaisista tiivistysongelmista.

Korvakekannen huomattava etu on sen edullisuus ja helppo valmistettavuus, sillä kansi saadaan valmistettua muotissa yhdestä levyleikkeestä kahdella työkalun iskuliikkeellä ja reunapyörityksen rullauksella, eikä siinä ole valmistuksellisesti hankalia muotoja, joista johtuen kantta täytyisi esimerkiksi pyöritellä eri asentoihin valmistuksen aikana. Kansi on myös maalitehtaan kannalta käytännöllinen, sillä se on yksinkertaisen muotonsa ansiosta helppo lyödä kiinni purkkiin automaattisella purkituslinjalla ja sopii maalinsekoituskoneen kiinnityksiin. Kuvassa 3.1. näkyy avattu korvakekansi.



**Kuva 3.1.** Kuvan korvakekannella varustetussa maalipurkissa korvakkeet ovat avattuna ja kannen voi nostaa pois

### 3.2 Painokansi

Painokansiastia on yrityksen tuotevalikoimassa pienemmille, korkeintaan yhden litran tilavuuksille käytetty purkkityyppi. Kuten nimestä voi tässäkin tapauksessa päätellä, astia suljetaan painamalla kansi paikalleen purkin yläreunassa olevaan erilliseen kansirenkaaseen, joka on muotoiltu ja mitoitetu niin, että se puristaa kannen tiukasti kiinni purkkiin. Kannen suljennan yksinkertaisuus on erityisesti maalin valmistajan kannalta edullista, sillä kansi saadaan painettua paikalleen pelkällä sylinterin työntöliikkeellä, eikä minkäänlaiselle monimutkaiselle suljentamekanismille ole tarvetta. Tämän kansityypin ongelma kuitenkin on, että sen avaamiseen ja sulkemiseen vaaditaan suhteellisen paljon voimaa, mikä ei ole loppukäyttäjän näkökulmasta käytännöllistä. Tyypillisesti kansi avataan asettamalla asianmukainen pitkävärtinen työkalu kannen ja kansirenkaan väliseen uraan, jolloin työkalua vipuvartena käyttämällä saadaan väännettyä kansi irti purkista. Käytännössä kannen avaaminen ei kuitenkaan aina ole aivan näin yksinkertaista. Ensinnäkin paineilmasylinterillä paikalleen painetun kannen ja kansirenkaan väliin jäävä rako on hyvin pieni joten työkalun asettaminen tukevasti tähän rakoon on hankalaa. Ruuvimeisselin mittaisella vipuvarrellakin avaaminen vaatii vielä kohtuullisesti voimaa, minkä seurauksena tämänkin purkkityypin kohdalla paikaltaan lipsahtava työkalu voi aiheuttaa vakavia vaaratilanteita. Työkalua käytettäessä voima kohdistuu hyvin pienelle alueelle, mikä aiheuttaa helposti kannen tai

kansirenkaan vääntymisen, jolloin kantta ei voida enää uudelleensulkea tiiviisti. Kannen sulkeminen on muutenkin hankalaa, sillä se vaatii huomattavasti puristusvoimaa. Kannen saa helpommin suljettua iskutyökalulla, esimerkiksi vasaralla, mutta myös tämä voi vaurioittaa ohutta kansirakennetta tai purkkia. Hankalasta avattavuudesta seuraa edelleen samoja ongelmia, kuin edellä esitellyllä korvakekannellakin. Kuvista 3.2. ja 3.3. näkyvät valmistusvaiheessa kanteen painetut muodot, joiden tehtävä on jäykistää kantta ja parantaa sen sulkemistiukkuutta.



**Kuva 3.2.** *Painokansipurkki avattuna. Vasemmalla ylösalaisin oleva kansi painetaan kiinni purkkiin niin suurella voimalla, että sen avaaminen ilman työkaluja on hankalaa.*



**Kuva 3.3.** *Painokansipurkki kannen ollessa paikallaan. Avaaminen tapahtuu useimmiten työntämällä pitkävartinen työkalu kannen ja purkin väliseen uraan ja käyttämällä sitä vipuvartena.*

### 3.3 Vannepainokansi

Vannepainokansi on ulkonäöltään normaalia painokantta muistuttava kansityyppi, jota ei kuitenkaan sellaisenaan paineta kiinni purkin suuhun suurella voimalla. Sen sijaan vannepainokansi asetetaan vain purkin suulle ja kiristetään erillisellä metallivanteella. Näitä vanteita on kahdentyyppisiä, oman sulkumekanisminsa sisältävä, uudelleensuljettava salpavanne, joka voidaan sulkea ja avata käsivoimin, sekä yksinkertaisempi, mutta kertokäyttöinen erillisellä koneella suljettava vanne. Näillä molemmilla on omat hyvät ja huonot puolensa, sekä edellä esiteltyihin kansityyppeihin, että toisiinsa nähden. Kuvassa 3.4. näkyy käsikäyttöisellä salpavanteella varustettu kansi.



**Kuva 3.4.** Käsikäyttöisellä salpavanteella varustettu vannepainokansi. Sulkemalla kuvassa vasemmalla näkyvä salpamekanismi vanne kiristyy, puristaen kannen tiukasti kiinni purkkiin.

Käsivanteen ehdoton etu on sen uudelleensuljettavuus, sillä tällä mekanismilla on teoriassa mahdollista avata ja sulkea purkki lukuisia kertoja niin, että purkki säilyy tiiviinä. Ongelma tässä on, että vanteen suljentamekanismin jäykkyyteen vaikuttavat monet seikat, kuten purkin suurullauksen korkeus, kannen tiivistekerroksen paksuus, sekä purkin suun ja kannen halkaisija. Vaikka nämä arvot ovatkin nimellisesti vakioita ja purkit ovat pääsääntöisesti tehtaalta tullessaan hyvin toleranssissa, esiintyy niissä silti lähes huomaamattoman pientä vaihtelua. Tämä pienikin vaihtelu vaikuttaa merkittävästi suljentamekanismin jäykkyyteen, ja toisinaan käsikäyttöiseksi tarkoitetun suljentavanteen käyttö vaatii niin suurta voimaa, että erillisten työkalujen käyttö on suotavaa, ellei

peräti välttämätöntä. Mekanismin ollessa tiukka se voi myös aiheuttaa käyttäjälle vaaratilanteita, sillä salpa iskeytyy suljettaessa kiinni suurella voimalla, jolloin käyttäjän sormet ovat vaarassa jäädä liikkuvien osien väliin. Salpa voidaan vielä varmistaa erillisellä sokalla turvallisen kuljetuksen varmistamiseksi.

Toinen vaihtoehto vannepainokannen sulkemiseen on rakenteeltaan yksinkertaisempi kertakäyttövanne. Tehtaalla L-profiilin muodossa oleva metallivanne asetetaan kannen reunan päälle ja puristetaan erillisellä koneella kiinni purkin reunapyöristykseen, esimerkiksi pneumaattisesti. Vanne on valmistettu ohuesta levystä renkaan muotoon ja siinä on liitossauman vieressä uloke, josta repäisemällä vanne saadaan rikottua. Purkin avaaminen on suhteellisen helppoa, sillä maalarille riittää repäistä vanne auki pihdeillä, minkä jälkeen kansi on helppo nostaa sivuun. Luonnollisesti tässä on myös huono puolensa, sillä tämä suljentatyyppi ei yksinkertaisuudessaan tarjoa minkäänlaista uudelleen-suljettavuutta, vaan vanteen rikkouduttua koko purkki täytyy käyttää kerralla.

## 4 MAALIPURKIN KANNEN SUUNNITTELU

Tässä kappaleessa käsitellään kokonaisuudessaan itse tuotesuunnitteluprosessin kulku. Kappaleessa 4.1 lähdetään liikkeelle asiakaskyselyn ja viranomaissäännösten perusteella määritellyistä suunnittelutavoitteista ja – kriteereistä. Seuraavaksi kappaleessa 4.2 siirrytään tarkastelemaan suunnittelun lähtökohtana toiminutta teollisen muotoilijan hahmottelemaa alkuperäiskonseptia. Tässä yhteydessä selviää millaisia analyyseja konseptimallille suoritettiin ja minkälaisia johtopäätöksiä niiden perusteella tehtiin mekanismin toimivuudesta.

Kappaleessa 4.3 alkaa luonnosteluvaihe ja varsinainen uuden tuotteen kehitys. Kappaleen ensimmäisessä vaiheessa esitellään, minkälaisia muutoksia alkuperäiseen konseptiin tehtiin toiminnallisuuden parantamiseksi ja minkälaisia tuloksia näiden muutosten seurauksena saatiin. Ensimmäisen kappaleen tulosten perusteella siirrytään kehittämään vaihtoehtoja kansimallia ja kappaleen toinen vaihe käsittelee tämän toisentyypin kannen suunnitteluprosessia. Neljännen kappaleen lopussa käydään vielä läpi kannen prototyyppiä ja valmistusta varten tehdyt alustavat suunnitelmat. Lopullisen kannen analyysejä ja malleja esiteltäessä ei tämän työn yhteydessä annetta tarkkoja tuloksia, mittoja tai muitakaan numeroarvoja johtuen Metalpak Oy:n esittämästä toiveesta olla esittämättä tarkkaa tuotetietoa julkisissa dokumenteissa.

### 4.1 Tuotteelle asetetut vaatimukset

Lähtökohtana oli siis valmistaa helposti avattava kansi, joka perustuisi ohuen kuorirakenteen läpilyönti-ilmiöön. Alustava suunnitelma kannen muodosta oli jo hahmoteltu, mutta tämän muodon toimivuudelle oli tehty vain suuntaa antavia simuloitteja eikä mitään lopullista ollut lyöty lukkoon. Uutta kantta suunniteltaessa tuli ottaa huomioon lukuisia eri näkökohtia, jotka vaikuttivat kannen muotoon ja toimintaan. Luonnollisesti kansia valmistavan yrityksen, tässä tapauksessa Metalpakin, toiveena oli että uusi kansi olisi edullinen ja helposti valmistettava. Kannen valmistuksen tuli myös olla toteutettavissa automaattisella valmistuslinjastolla, mieluiten niin että muodonantoon sisältyisi mahdollisimman vähän työvaiheita. Toivomuksena oli myös, että uudentyyppistä kantta voitaisiin käyttää yhdessä vanhantyyppisten maalipurkkien kanssa, tai ettei olemassa olevan purkin rakenteeseen tarvitsisi ainakaan tehdä suuria muutoksia. Mikäli tämä ei osoittautuisi mahdolliseksi, tulisi luonnollisesti myös suunnitella sellainen purkki, jonka kanssa kantta olisi mahdollista käyttää.

Vaikka suunnittelussa pyrittiin korostamaan valmistettavuutta, täytyi kehitysprosessin aikana huomioida myös muiden sidosryhmien vaatimukset ja toiveet onnistuneen tuotteen aikaansaamiseksi. Tämän toteuttamiseksi oli jo ennen diplomityön aloittamista

suoritettu erillinen tutkimus- ja kehitysprojekti asiakastarpeiden kartoittamiseksi yhteistyössä Taideteollisen korkeakoulun Länsi-Suomen muotoilukeskus Muovan, sekä maalinvalmistajien ja jälleenmyyjien kanssa. Käytännössä projekti toteutettiin havainnointi- ja haastattelututkimuksena todellisessa käyttöympäristössä, minkä yhteydessä kerättiin käyttäjien mielipiteitä nykyisistä maalipurkeista ja tutkittiin maalipurkkien loppukäyttäjiltä saatua asiakaspalautetta.

Ensinnäkin maalinvalmistajalla oli omat vaatimuksensa maalipurkille. Yleisiä maalipurkkiin liittyviä vaatimuksia oli pitkä lista, mutta tässä keskitytään lähinnä olennaisesti sellaisiin joilla on olennaisesti vaikutusta kannen muotoon ja toimintaan. Purkkeja tulisi kuljetuksessa, varastoinnissa ja tuotannossa pystyä pinoamaan tukevasti sisäkkäin, joten vanhan purkin kartiomaisesta muodosta ei voitu luopua, eikä tähän olisi varsinaisesti ollut syytäkään. Avaamattomasta purkista tulisi nähdä, ettei sitä ole avattu joten jonkinlainen sinetti olisi paikallaan. Purkin pitäisi olla helppo avata, tosin tämä olikin jo perustana koko suunnitteluprojektin aloittamiselle. Lopuksi purkilta haluttiin helppoa uudelleen avattavuutta, niin että myös tiiviste säilyisi vahingoittumattomana vaikka purkkia avattaisiin useitakin kertoja. Viimeiseksi mainittu itse asiassa oli vaatimus jokaiselta projektin sidosryhmältä.

Seuraavana vuorossa oli maalipurkkien jälleenmyyjien tarpeet. Myyjien toiveet olivat monilta osin samoja, kuin maalinvalmistajien, mutta myös joitakin muita näkökohtia nousi esiin. Purkin täytyy avautumatta ja vuotamatta kestää mahdolliset kolhut ja putoamiset joita esimerkiksi kuljetuksen aikana saattaa tapahtua. Tämä sama vaatimus tulee vastaan myös maalipurkkeja koskevassa lainsäädännössä, sillä purkin tulee läpäistä sarja erinäisiä testejä joilla mitataan nimenomaan purkin kykyä sietää iskuja ja painenvaihteluita. Näistä kerrotaan tarkemmin luvun lopussa. Jälleenmyyjät vaativat myös ymmärrettävistä syistä, että purkkien olisi oltava helposti ja tukevasti pinottavissa esimerkiksi varastossa ja myymälän hyllyssä. Kannen kannalta erityinen huomio oli, että sen tulisi kestää maalien sävytystä varten tehtävä rei'itys läpäisytyökalulla. Purkin tulisi olla myös sen kokoinen ja muotoinen, että se kestäisi sekoituksen sekoituskoneessa. Kannen toimintamekanismin olisi myös oltava kuluttajalle helposti ymmärrettävä.

Viimeisenä käytiin läpi palaute maalipurkkien loppukäyttäjiltä, mukaan lukien niin ammatti-, kuin harrastelijamaalaritkin. Vaatimukset olivat hyvin pitkälle samoja, kuin edellisissäkin asiakasryhmissä, esimerkiksi kannen sulkemisen tulisi olla toistuvasti helppoa, nopeaa ja purkin tulisi olla tiivis myös uudelleensulkemisen jälkeen. Kannen avaamiseen liittyviin toiveisiin saatiin kuitenkin vielä joitain lisätarkennuksia. Käyttäjien toive oli ennen kaikkea että purkin avaaminen olisi mahdollista pienellä voimalla ilman työkaluja, mikä tässä suunnittelussa yritettiin ottaa ensisijaisesti huomioon. Avausliikkeen ja – asennon tuli olla mukava ja turvallinen, ja avaustavan haluttiin olevan selkeä ilman erillistä perehtymistä. Erityisesti ammattimaalarien toive oli, että avattu kansi kulkisi siististi mukana, eikä olisi tiellä tai sotkisi ympäristöä. Ajatus oli hyvä mutta sen toteuttaminen yhdessä kaikkien muiden vaatimusten kanssa niin, että kannen suunniteltuun toimintaperiaatteeseen ei täytyisi tehdä mittavia muutoksia, osoittautui



haastavaksi. Ainakin tässä vaiheessa suunnittelua kyseinen toive siis jätettiin vielä toissijaiseksi suunnittelukriteeriksi. /6/

Kemikaalien säilytykseen tarkoitettujen astioiden kehitys- ja suunnittelutyössä on huomioitava vaarallisten aineiden kuljetusta ja säilytystä koskeva lainsäädäntö. Säilytysastian tulee olla tiivis ja läpäistä tietyt standardienmukaiset testit, jotka maalipurkeille ovat pudotuskoe, tiiviyskoe, nestepainekoe ja pinoamiskoe.

Pudotuskokeessa astia täytetään nesteellä nimellistilavuuteensa ja pudotetaan kovalle ja tasaiselle alustalle tavalla, joka todennäköisimmin aiheuttaa rikkoutumisen. Purkki tulee siis pudottaa niin, että ensimmäisenä maahan osuu esimerkiksi hitsaussauma, sulku-laite tai muu heikompi osa rakenteesta, joka rikkoutuu tasapaksua seinämää herkemmin. Mikäli rakenteessa ei esiinny tällaisia heikompia kohtia, purkki pudotetaan maahan kulma edellä, jolloin iskusta aiheutuva voima kohdistuu pienelle alueelle ja pudotuksen vaikutus on mahdollisimman suuri. Pudotuskokeen tarkoitus on simuloida tilannetta, jossa säilytysastia pääsee putoamaan maahan esimerkiksi säilytyksen tai kuljetuksen aikana, ja varmistaa ettei tällaisessa tilanteessa pääse tapahtumaan vuotoa aiheuttavaa astian hajoamista. Pudotuskorkeus määräytyy käytettävän kemikaalin mukaan, ja se vaihtelee tavallisesti noin puolen metrin ja kahden metrin välillä.

Tiiviyskoe ja nestepainekoe ovat melko samankaltaisia testejä, joilla testataan pakkauksen paineensietokykyä. Tiiviyskokeessa pakkauksen tiiviyyttä testataan paineistamalla pakkaus ilmalla standardin mukaiseen ylipaineeseen, jonka jälkeen se upotetaan veteen. Pakkaukseen ei luonnollisesti saa päästä nestettä ulkopuolelta. Nestepainekoe on tälle tavallaan käänteinen koe, jossa pakkaus täytetään nesteellä ja paineistetaan sisältä. Tässäkään tapauksessa pakkauksen sisä- ja ulkopuolen välistä vuorovaikutusta ei saa tapahtua, eli käytännössä pakkauksesta ei saa paineistettuna vuotoa nestettä. Molemmista testityypeissä tyypillinen testiaika on maalipurkin tapauksessa viisi minuuttia.

Neljäs testityyppi, eli pinoamiskoe testaa pakkauksen rakenteellista kestävyyttä tilanteessa, jossa pakkauksen päälle kuormitaan lisäpainoa. Tämä simuloi tyypillistä kuormitusilannetta kuljetuksessa ja varastoinnissa, jossa maalipurkit pinotaan päällekkäin. Testissä pakkauksen yläpintaa kuormitetaan voimalla, joka vastaa suurinta sallitua yksittäisen maalipurkin päälle pinottua massaa kuljetustilanteessa. Lainsäädännön huomiointi on pakkauksen käyttäjäturvallisuuden kannalta erittäin olennaista ja se tuo omat haasteensa maalipurkin suunnitteluun. /2/

## 4.2 Alkuperäinen konsepti ja alustavat laskelmat

Kuten jo aikaisemmin työssä on kerrottu, alkuperäinen idea uuteen kansityyppiin tuli Länsi-Suomen Muotoilukeskus Muovalta. Muova oli maalliteollisuuden asiakastarpeiden kartoittamista varten tehdyn tutkimusprojektin perusteella luonut joitakin erilaisia maalipurkkikonsepteja Metalpak Oy:lle, joka päätti alkaa jatkokehittää kuvien 4.1. ja 4.2. mukaista kansikonstruktiota. Suunniteltu kansi perustui kaarevan ohutlevyrakenteen lommahdusilmiöön, jossa kannen ulkokehällä olevat pienet kaarevat liuskat lommahtavat painettaessa sisäänpäin lukiten kannen kiinni purkin yläreunaan.



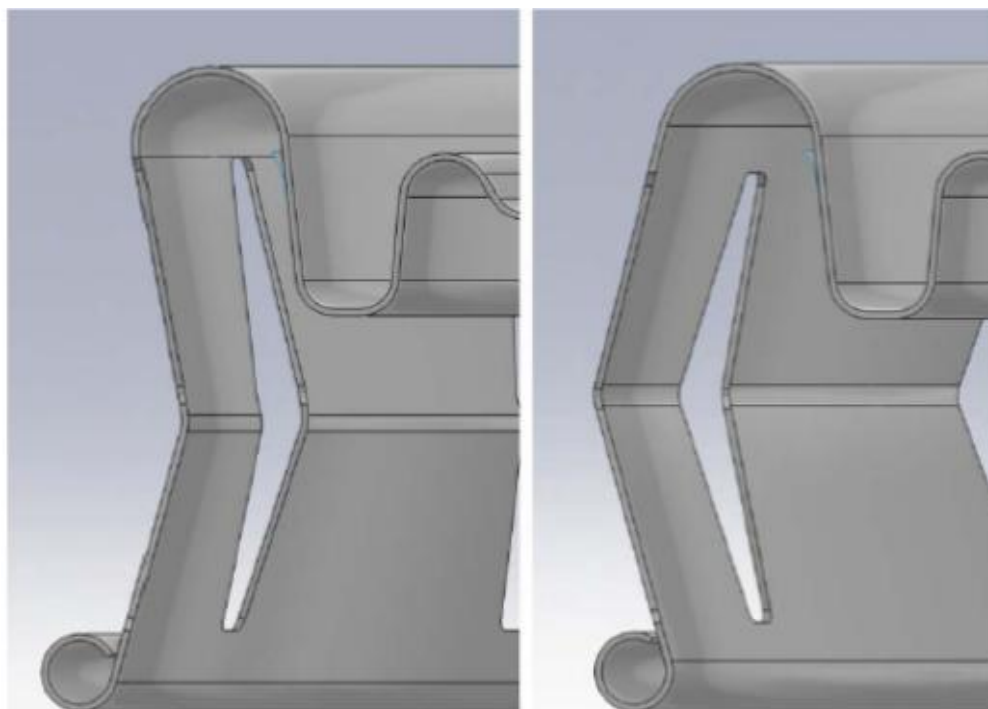


**Kuva 4.1.** Muotoilukeskuksen hahmotelma uuden tyyppiselle maalipurkille. Kuvassa kannen kaulus on painettuna sisään, jolloin purkki on suljettuna.



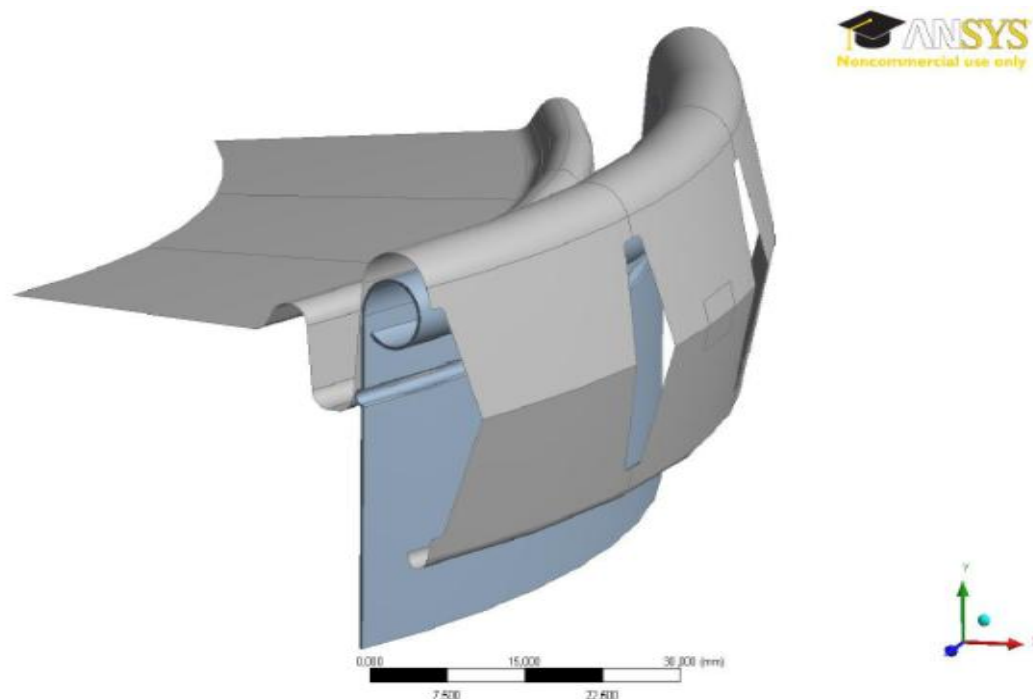
**Kuva 4.2..** Kansi avatussa asennossa. Kannen kaulus vedetään tai painetaan ulos, jolloin purkin reunaa vasten puristunut ura löystyy ja kansi voidaan nostaa irti purkista.

Tässä vaiheessa kansimekanismin toiminnasta käytännössä ei ollut olemassa vielä minkäänlaista arviota, vaan tuotteen muoto perustui täysin teollisen muotoilijan ideaan. Koska yrityksellä ei ollut tarvittavia resursseja kansimekanismin toiminnan tarkempaan analyysiin, päätettiin ottaa yhteyttä Tampereen Teknillisen Yliopiston Konstruktio-tekniikan laitokseen, jonka kanssa sovittiin kannen alustavasta FEM-analyysistä jatkokehityksen kannattavuuden selvittämiseksi. Kannen toimintaperiaate on nähtävissä kuvan 4.3. poikkileikkauksessa.



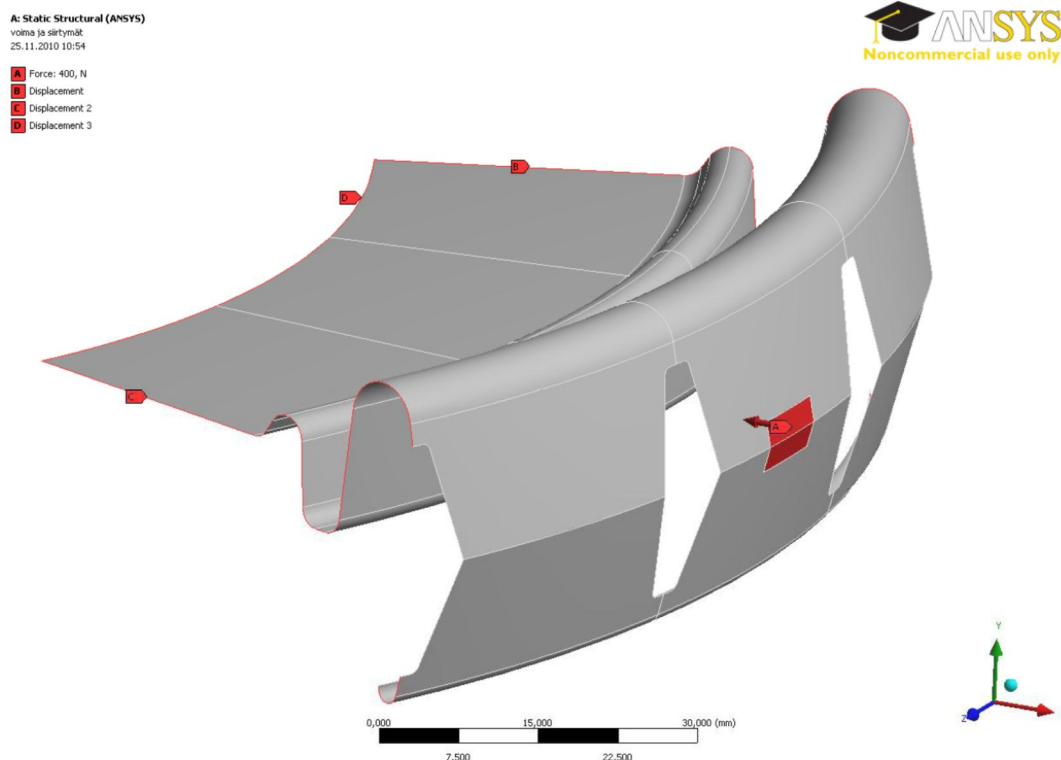
**Kuva 4.3.** Poikkileikkaus alkuperäisen kansikonseptin toimintaperiaatteesta. Vasemmalla kansi suljetussa asennossa ja oikealla avattuna. /7/

Teknillisellä yliopistolla luotiin kappaleen toiminnallisesta osasta kuvan 4.4. mukainen CAD-malli. Malliin ei sisällytetty kokonaista kantta, vaan siinä tarkastellaan vain pientä, kolmesta liuskasta koostuvaa, sektoria kannen reunasta laskennan keventämiseksi. Kantta ei myöskään mallinnettu tilavuutena, vaan keskipintamallina, jolle määriteltiin tasainen paksuus elementtiverkon luomisen yhteydessä. Auki jätettyjen reunojen ei-toivotut liikesuunnat on mallissa lukittu paikalleen asianmukaisilla reunaehdoilla, jolloin liuskan lommahtaminen vastaa mahdollisimman hyvin todellista tilannetta. Kuvassa 4.4. sinisenä näkyvää maalipurkin reunaa ei jätetty lopulliseen analyysiin, sillä reuna-ehdojen asettamisen jälkeen sen läsnäololla ei ollut vaikutusta laskennan lopputulokseen. /7/



**Kuva 4.4.** *Kannen laskennallista tarkastelua varten luotu CAD-malli. Harmaa osa on sektori maalipurkin kannesta ja sininen osa itse maalipurkista. Purkin läsnäolo todettiin laskennassa merkityksettömäksi, joten se poistettiin tulevista analyyseistä.*

Mallin rakenneanalyysi suoritettiin ANSYS – ohjelmistolla. Voima asetettiin kohtisuorasti keskimmäisen liuskan puoliväliin, kuten kuvasta 4.5. on havaittavissa. Koska tavoitteena oli selvittää lommahtamiseen vaadittavan voima suuruus, ei voimaa ollut ennalta määrätty vaan sitä approksimoitiin analyysin edetessä.



**Kuva 4.5.** *Analyyssissä käytetyt tuennat ja kuormitus. Kannen osa on kiinteästi tuettu kolmelta sivulta realistisen tuennan aikaansaamiseksi. Sulkemisvoima kohdistetaan liuskan keskellä punaisena näkyvälle pienelle alueelle, jolloin liuskan tulisi lommahtaa vastakkaiseen tasapainoasemaan.*

Puuttumatta erityisen tarkasti alustavan rakenneanalyysin yksityiskohtiin, todetaan vain että analyysi suoritettiin epälineaarisen statiikan menetelmin. Kannen ajateltiin toimivan täysin elastisesti, joten plastiseen muodonmuutokseen liittyvät ilmiöt jätettiin huomioimatta. Laskennan perusteella saatiin seuraavanlaisia tuloksia:

- Liuskan lommahtamisen toivottiin alun perin olevan toteutettavissa sormin painamalla. Analyysin perusteella vaadittava voima on kuitenkin huomattavasti liian suuri tämän toiveen toteutumiseksi.
- Purkin kiinni pysymisen edellytyksenä liuskan tulisi pysyä lommahtaneena kun ulkoinen voima poistetaan. Näin ei laskennan perusteella käynyt vaan liuska palautui itsestään alkuperäiseen tilaansa.
- Rakenteen lommahtaessa materiaaliin syntyi erittäin suuri jännitys mikä ylitti materiaalina käytetyn teräksen myötörajan.

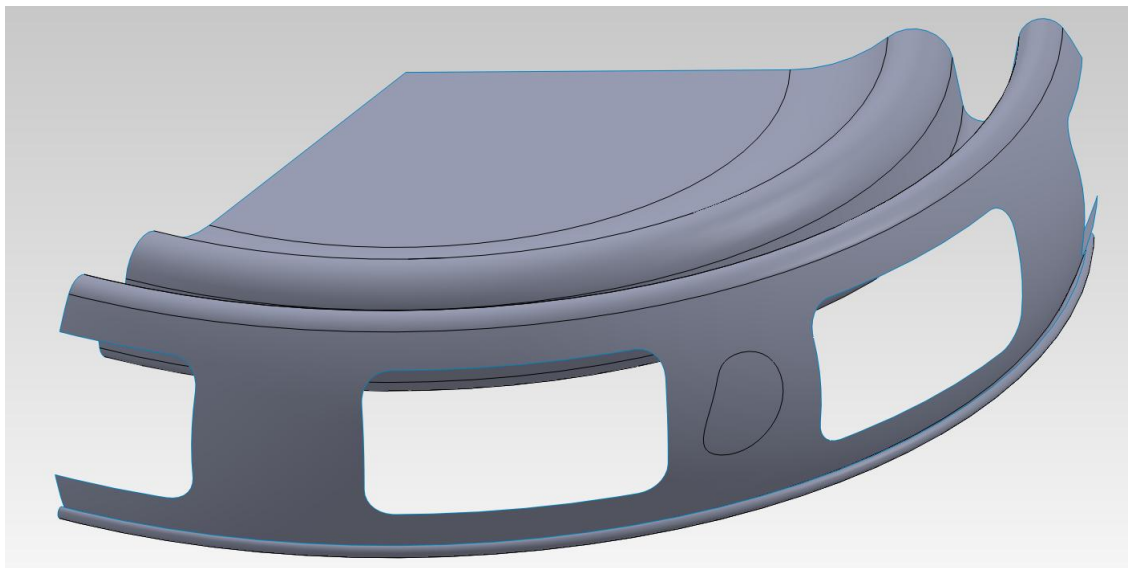
Vaikka tulokset eivät alustavissa laskelmissa näyttäneet kannen toiminnan kannalta kovin lupaavilta, epäiltiin, että joidenkin rakenteellisten muutosten avulla mekanismin toimivuutta saataisiin parannettua. Ensinnäkin lommahtamisen ennakoitiin helpottuvan liuskan kaksoiskaarevuuden poistamisella tai minimoimisella. Liuskan puolivälissä (ku-

va 4.4) näkyvän terävän särmän epäiltiin jäykistävän rakennetta tarpeettoman paljon. Lisäksi mekanismin epäiltiin toimivan paremmin, mikäli yksittäisiä liuskoja kavennettaisiin, niiden välissä olevia rakoja suurennettaisiin, liuskoja yhdistäviä kannaksia kevennettäisiin tai useampia liuskoja painettaisiin yhtäaikaaisesti. Myös kannen ainevahvuutta muuttamalla oletettiin saatavan parempia tuloksia. Näiden muutosten lähempää tarkastelua ei kuitenkaan toteutettu vielä rakenteen esiarvioinnissa, jonka tarkoitus oli pääasiassa vain määrittää suunnitellun rakenteen toimivuutta. /7/

### 4.3 Uuden tuotteen kehitysprosessi

Kehitystyötä lähdettiin siis jatkamaan edellä esitellyistä lähtökohdista. Aluksi oli olennaista selvittää saataisiinko alkuperäinen, luvussa 4.2 esitelty rakenne toimimaan halutulla tavalla vähäisin muutoksin. Tätä tarkastelua varten luotiin SolidWorks - ohjelmistolla kannen sektorista uusi keskipintamalli, jonka mittoja olisi helppo muuttaa iteratiivisen rakenneanalyysin toteuttamiseksi. Tämä jatkokehitystä varten luotu malli näkyy kuvassa 4.6. ja kuten voidaan huomata, siinä on jonkin verran eroavaisuuksia alustavassa analyysissä käytettyyn malliin verrattuna.

Koska alustavassa analyysissä oli todettu, että lommahtavan liuskan keskellä oleva terävä taitos aiheutti rakenteeseen liikaa jäykkyyttä, korvattiin tämä taitos pyöreämmällä jatkuvalla kaarella jo heti ensimmäisessä mallissa. Lisäksi liuskojen välisten rakojen leveyttä suurennettiin, sillä kuten luvussa 4.2 oli mainittu, epäiltiin sen helpottavan yksittäisen liuskan liikettä, koska liian lähellä vierekkäin olevat liuskat tukivat toisiaan kasvattaen näin lommahtamiseen vaadittua voimaa. Rakojen muoto poikkeaa alkuperäisestä kulmikkaan elliptisestä muodosta, sillä terävät materiaaliin päin suuntautuneet kulmat pyrittiin poistamaan tarpeettomien jännityshuippujen eliminoinemiseksi. Tästä syystä liuskojen väliset raot muotoiltiin suorakulmaisiksi, käyttäen lisäksi suhteellisen suuria kulmapyöristyksiä. Kuvassa 4.6 liuskan keskellä näkyvä rengas kuvaa aluetta johon kohdistetaan ulkoinen voima kansimekanismia käytettäessä. Tämän alueen ajateltiin karkeasti kuvaavan käyttäjän peukalon kokoista ja muotoista pinta-alaa, sillä kannen tuli olla käytettävissä sormivoimin ilman erillisiä työkaluja. Kannen alareunan pyöristystä myös muokattiin helpommin valmistettavaan muotoon.



**Kuva 4.6.** Ensimmäinen muokattu malli kannesta. Merkittävämpiä muutoksia ovat aiempaa pehmeämmät muodot jännityskeskittymien minimoimiseksi, leveämmät raot liuskojen välillä sekä peukalonjäljen muotoa mukaileva sulkemisvoiman vaikutusalue.

Laskentaa varten luotu malli siirrettiin ANSYS – ohjelmaan, jossa sille luotiin elementtiverkko staattista rakenneanalyysiä varten. Lommahdus sinällään on tavallisesti dynamiikkaan liittyvä ilmiö. Koska lommahduksen jälkeinen tasapainotila saadaan kuitenkin selvitettyä rakenteen muodonmuutoksen tasapainopolkua seuraamalla eikä tässä tapauksessa dynaamisilla tekijöillä ole merkitystä, ei varsinainen dynamiikka-analyysi ole tarpeellinen. Rakenteelle siis suoritetaan vain staattinen analyysi, jolla saadaan riittävällä tarkkuudella määritettyä mekanismin käyttäytyminen. Kannen materiaaliksi määritettiin tavallinen rakenneteräs. Tavallisesti teräksen myötöraja vaihtelee välillä 200 – 500 MPa, mutta korkeamman myötörajan teräkset saattavat olla hyvinkin kalliita, joten materiaalin jännitykset pyrittiin saamaan mahdollisimman mataliksi.

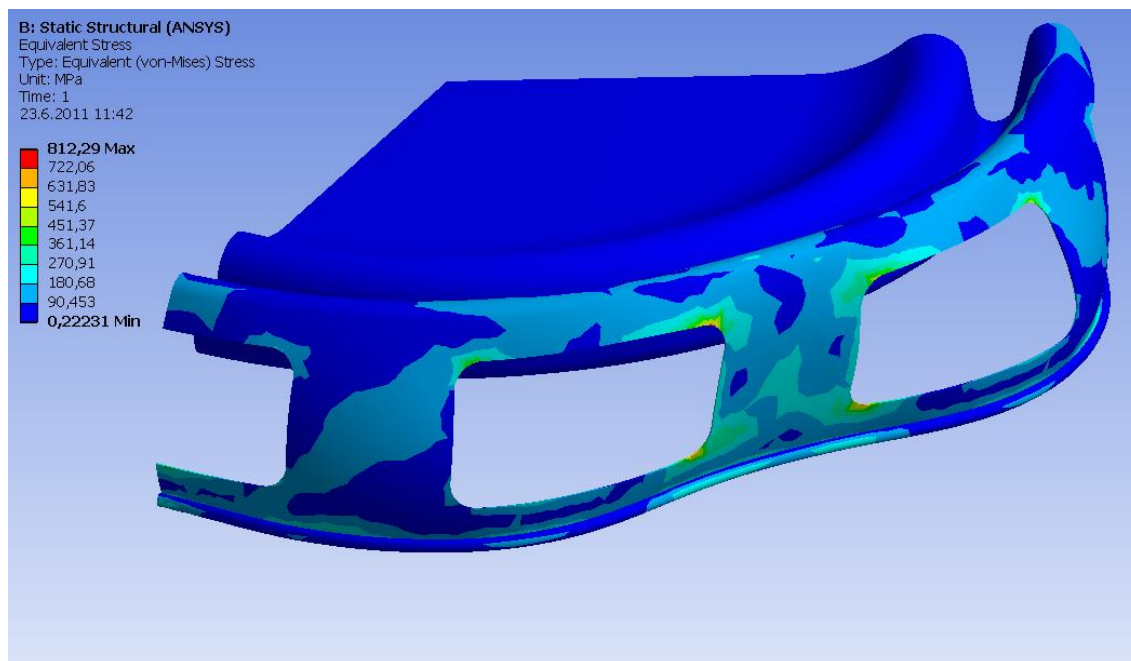
Tavallisesti tämän tyyppinen ongelma voidaan ratkaista Newton-Raphson iteraatiolla juuri läpilyöntiä edeltävään pisteeseen asti, mutta lommahtamisen jälkeisen tilan laskemiseen tarvitaan muita menetelmiä, sillä ongelman ratkaisu ei konvergoitu kriittisessä pisteessä tai sitä suuremmilla arvoilla. Tämä johtuu rakenteessa läpilyönnin yhteydessä alaspäin kääntyvästä tasapainokäyrästä, jota Newton-Raphsonin on hankala käsitellä. /5/

Menetelmää käyttämällä saatiin kuitenkin karkeasti arvioitua kriittisen rajakuorman arvoa kasvattamalla voimaa kuormitusaskelina vähän kerrallaan. Pienempien kuormitusaskeleiden ratkaisut konvergoituivat hyvin, mutta voiman kasvaessa lommahduskuorman yli, ei konvergoitumista tapahtunut ja laskenta keskeytyi. Tällöin voitiin arvioida kriittisen kuorman olevan lähellä viimeisintä suoritettua kuormitusaskelta. Newton-Raphson-iteraation käyttäminen on analyysissä nopeaa kriittistä kuormitusta pienemmillä voiman arvoilla, joten sitä pyrittiin käyttämään voiman suuruusluokan kartoittamiseen. Kun päästiin lähelle arvioitua rajakuormaa, otettiin käyttöön ANSYS-ohjelman

”epälineaarinen stabilointi”-ominaisuus, jolla ratkaisu saatiin konvergoitumaan myös läpilyönnin tapahduttua.

Ensimmäisen laskennan jälkeen havaittiin mekanismeissa edelleen esiintyvän ongelmia. Vaikka tehtyjen geometriamuutosten avulla saatiin rakenteen maksimijännitystä pienennettyä, ylitti se silti selvästi teräksen myötölujuuden ja keskittyi pääasiassa liuskojen välisten rakojen kulmiin. Tämän perusteella voitiin ennakoida plastisen muodonmuutoksen syntymistä liuskojen ylä- ja alareunoihin, jolloin kantta ei enää sulkemisen jälkeen saataisi helposti avattua. Pahimmassa tapauksessa koko liuska saattaisi repeytyä, mikäli kulmissa esiintyvät jännityshuiput ylittäisivät murtorajan. Toinen ongelma oli kannen alareunan painuminen sisään, minkä seurauksena kannen reuna pikemminkin vääntyi sen sijaan, että siinä olisi tapahtunut lommahtaminen. Rakenteeseen jännitysten laskemiseksi tehtyjen muutosten jälkeen kannen alareuna ei ollut enää riittävän jäykkä vaan antoi periksi liuskaa painettaessa, jolloin tavoiteltua liuskan läpilyöntiä ei enää tapahtunut. Tämän ensimmäisen analyysin tulos on esitetty graafisesti kuvassa 4.7. Kuvasta nähdään kuinka keskimäinen liuska on painettaessa taipunut alareunastaan sisään, sen sijaan että se olisi lommahtanut keskikohdastaan, mikä alun perin oli tarkoituksena. Lisäksi suorakulmaisen muotoisten reikien kulmissa on havaittavissa jännityskeskittymät, joissa materiaalin jännitys vasemmassa reunassa näkyvän asteikon mukaan nousee pahimmillaan yli 800 MPa:n suuruiseksi. Tämä ei ole hyväksyttävä tulos, sillä lujimpienkaan tavallisten terästen myötöraja ei yllä näin korkealle.

Laskennan tuloksia yritettiin iteroida parempaan suuntaan muuttamalla käytettyä levynpaksuutta ja tekemällä pieniä rakenteellisia muutoksia. Näihin kuului muun muassa alareunan pyöryksen paksuntaminen suuremman jäykkyyden saavuttamiseksi, liuskojen leveyden muuttaminen sekä kapeammaksi että leveämmäksi ja liuskojen välisten rakojen siirtäminen lähemmäksi kannen yläosaa, jolloin ylä- ja alareunojen jäykkyydet olisivat lähempänä toisiaan. Liuskan osittainen läpilyönti saavutettiin joissakin tilanteissa, mutta näissäkään tapauksissa rakenne ei saavuttanut stabiilia tilaa, vaan palautui välittömästi alkuperäiseen muotoonsa kun liuskaa ei enää painettu. Pieniä muutoksia tehtiin useassa eri vaiheessa, eikä jokaisen yksittäisen rakennemuutoksen läpikäyminen ole tämän selvityksen yhteydessä tarkoituksenmukaista. Riittänee mainita, että näillä muutoksilla ei saavutettu tyydyttävää lopputulosta, joten mallin todettiin vaativan suurempia kehitysaskelia.

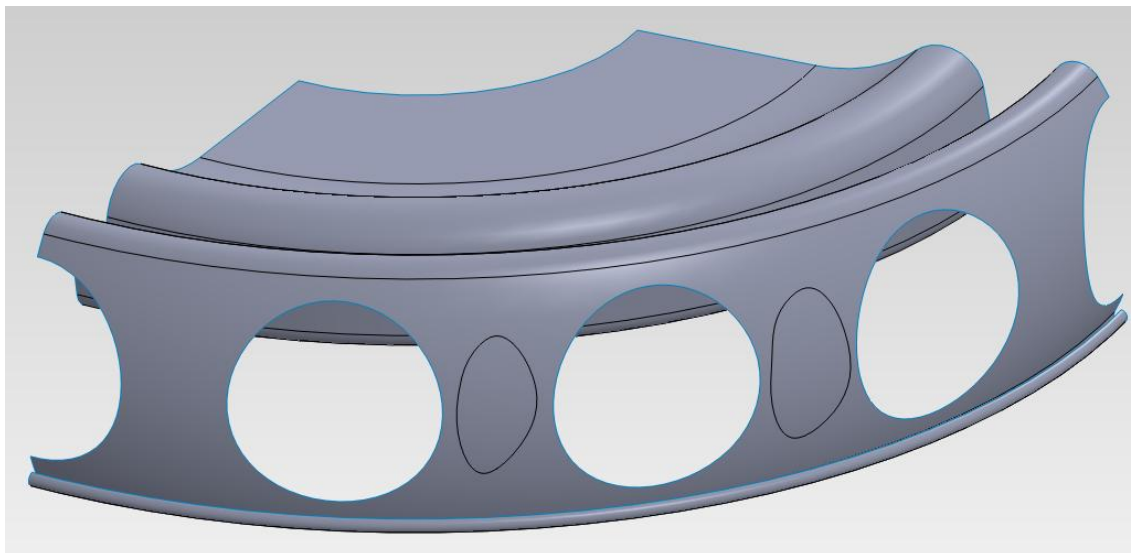


**Kuva 4.7.** Elementtianalyysin tulos kannen käyttäytymisestä. Kuvasta nähdään, kuinka kannen alareuna on liian heikko pysyäksensä muodossa ja se pettää kun liuskaa painetaan sisään. Neliskulmaisten reikien kulmiin muodostuu suuria jännityshuippuja.

Tehdyn analyysin perusteella päätettiin tehdä muutoksia sekä konstruktion muotoon, että analyysissä käytettävään kuormitustilanteeseen. Ensinnäkin liuskojen kulmiin syntyvät jännityskeskittymät oli olennaista pyrkiä eliminoimaan. Tämän toteuttamiseksi päätettiin kokeilla muotoa, jossa liuskojen väliset raot olisivat täysin pyöreitä reikiä, jolloin jännitys oletettavasti jakaantuisi tasaisemmin reiän ympäristöön. Toisen ongelman, eli kannen alareunan kasaan painumisen, todettiin voivan johtuvan suhteellisen suuren voiman keskittyessä pienelle alueelle ohueen kanteen. Tämän korjaamiseksi haluttiin kokeilla, josko useamman vierekkäisen liuskan painaminen samanaikaisesti helpottaisi kumulatiivisesti yksittäisen liuskan lommahtamista, jolloin mekanismin käyttäminen vaatisi yhden liuskan osalta vähemmän voimaa. Uutta analyysiä varten luotiin uusi, kuvan 4.8. mukainen CAD-malli.

Kuten kuvasta nähdään, on rakenteeseen lisätty toinen peukalonjälkeä mukaileva alue joten uudessa mallissa voidaan painaa kahta vierekkäistä liuskaa samanaikaisesti. Kuten edellä mainittiin, liuskojen väliset reiät on uudessa mallissa muutettu pyöreiksi. Näillä muutoksilla saatiin osittain aikaan toivotun kaltaisia muutoksia laskennan tuloksissa, mutta valitettavasti niiden mukana tuli myös uusia odottamattomia ongelmia.

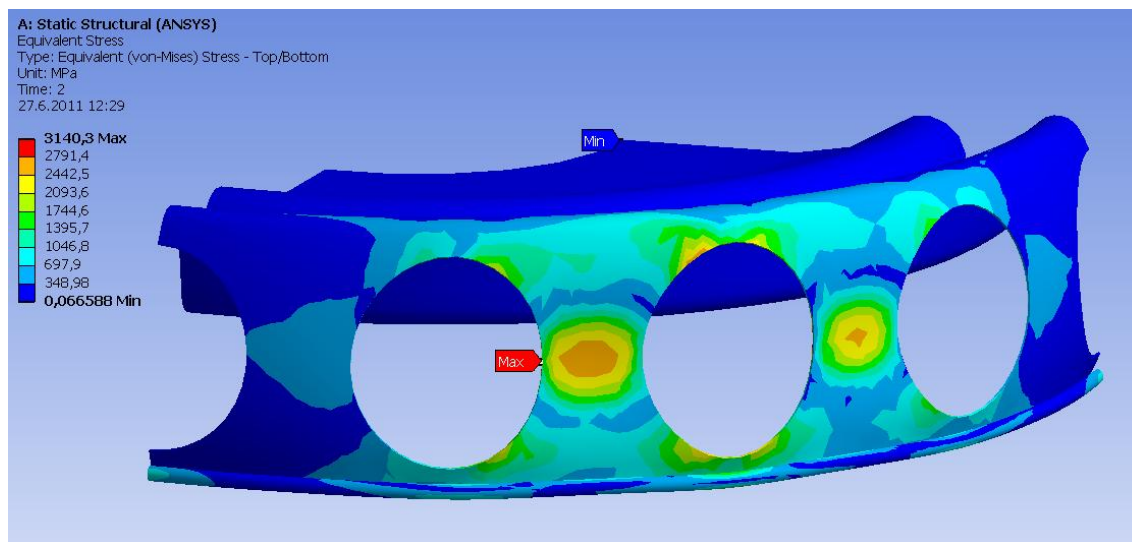




**Kuva 4.8.** Seuraavassa mallissa kokeiltiin jännitysten minimoimista täysin pyöreiden reikien avulla. Samalla mallia muokattiin niin, että siinä voitaisiin painaa kahta vierekkäistä liuskaa samanaikaisesti, sillä tämän arveltiin pienentävän yhden liuskan lommahduttamiseen vaadittavaa voimaa.

Ensimmäinen uuden mallin kanssa ilmennyt ongelma oli kahden samanaikaisesti painettavan liuskan aiheuttama laskenta-ajan pidentyminen. Yhden lommahduksen tapauksessa analyysin laskenta-aika pysyi kohtuullisen lyhyenä, mutta yritettäessä ratkaista ongelmaa useampien rinnakkaisten lommahdusten tapauksessa, kasvoi laskenta-ajan pituus huomattavasti. Tarkkaa syytä tähän ei löydetty, mutta osasyynä tähän oletettiin olevan se, että tällaisen ongelman ratkaiseminen vaikutti vaativan suurempaa laskentatarkkuutta. Tästä johtuen analyysi tuli suorittaa yhden lommahduksen tapausta pienemmillä askeleilla, mikä puolestaan lisäsi askelten määrää. Lisäksi laskentaohjelmiston vaikutti olevan hankala käsitellä useampaa rakenteessa samanaikaisesti tapahtuvaa läpilyöntilommahdusta annetuilla analyysiasetuksilla. Tämän hankaluuden kiertämiseen ei löydetty tehokasta keinoa. Lommahdusvoimille saatiin kuitenkin laskettua karkea arvio kokeilemalla kuinka suurilla voiman arvoilla ratkaisu vielä konvergoitui. Kahden liuskan samanaikaista puhdasta läpilyöntiä ei saatu analyysissä tapahtumaan, joten kahden liuskan tapauksessa ei ollut mahdollista kokeilla saavuttivatko molemmat liuskat yhtä aikaa vastakkaisen tasapainoaseman, vai olisiko rakenne osittain palautunut alkuperäiseen muotoonsa voiman poistamisen jälkeen.

Toinen ongelma muodostui pyöreiden reikien ympärille muodostuneesta jännitysjaumasta. Kuten alun perin oli oletettukin, reiän pyöreä muoto poisti pienet jännityskeskittymät liuskojen kulmista, mutta toisaalta nosti kauttaaltaan kokonaisjännitystä erityisesti liuskan keskeltä. Lopputuloksena rakenteen jännitykset nousivat huomattavasti materiaalin myötörajan ylittäviin arvoihin, joten tehdyn rakennemuutoksen todettiin olevan epäonnistunut. Myös tätä mallia yritettiin vielä muutella hieman parempien tulosten saavuttamiseksi, mutta muutoksista ei todettu olevan merkittävää hyötyä. Mallin jännitysjauma voidaan nähdä kuvasta 4.9.

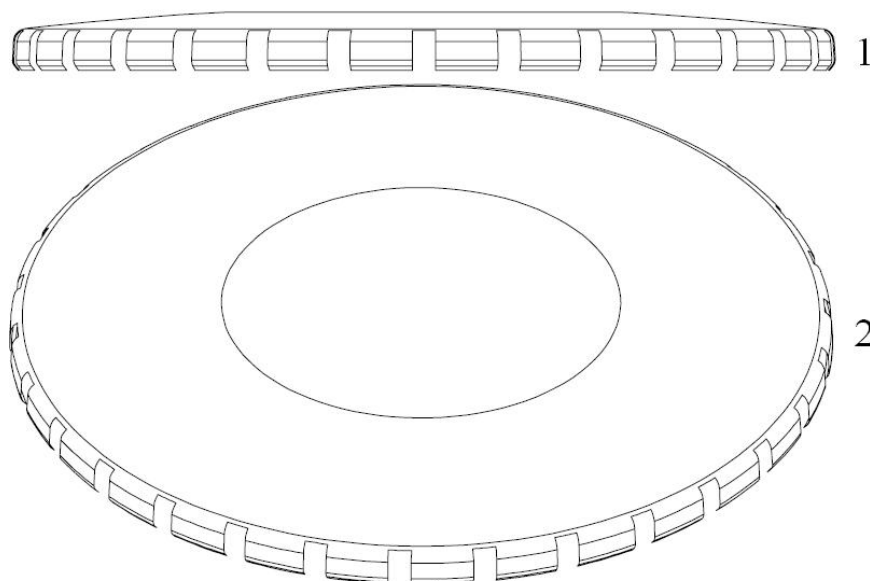


**Kuva 4.9.** Uuden mallin jännitysjauma lommahtamista edeltävällä hetkellä. Pyöreät reiät jäykistävät rakennetta liikaa, jolloin kannen sulkemiseen vaadittavat voimat ja rakenteen jännitykset nousevat suhteettoman suuriksi.

#### *Siirtyminen vaihtoehtoiseen kansikonseptiin*

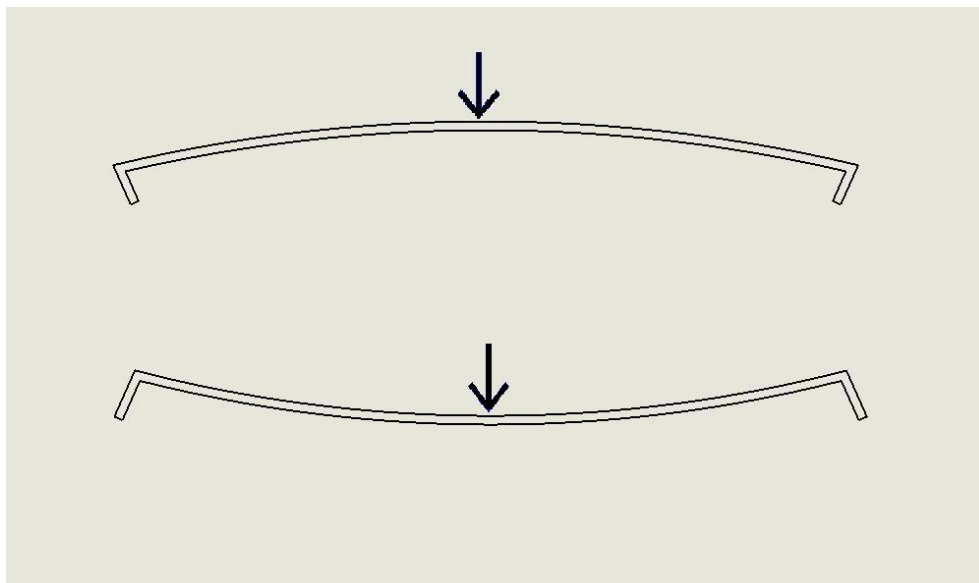
Tässä vaiheessa uuden kansityypin laskennalliseen tarkasteluun oli käytetty jo huomattavasti aikaa ilman minkäänlaisia lupaavia tuloksia. Jatkokehitys olisi toki ollut mahdollista, mutta lukuisien epäonnistuneiden simulointien jälkeen mallia ei uskottu saatavan toimimaan suunnitellusti diplomityön huomioiden kohtuullisessa ajassa ja ilman huomattavia rakenteellisia muutoksia. Tästä johtuen yrityksen toimesta esiteltiin tutkitun kansimallin rinnalle vaihtoehtoinen rakenneratkaisu, jonka toiminta yhä perustui samaan peruseriaatteeseen.

Alkuperäisen kannen avaamis- ja sulkemismekanismin perustuessa kantta ympäröivien liuskojen useisiin pieniin lommahduksiin, oli uuden esitellyn mekanismin peruseriaatteena yksi iso lommahdus, joka vaikuttaisi kauttaaltaan koko kanteen. Idea kannen toimintaan oli alun perin otettu pienestä karamellirasiasta ja tarkoituksena oli skaalata kansi suurempaan, maalipurkille sopivaan kokoon. Tämä ei kuitenkaan pelkästään riittänyt, sillä kuten aikaisemmin luvussa 4.1 kävi ilmi, on maalipurkille asetettu lukuisia vaatimuksia, joita luonnollisestikaan karamellirasian suunnittelussa ei ole ollut tarpeen huomioida. Tällaisia huomioonotettavia seikkoja olivat muun muassa kannen tiivistys, purkkien pinoaminen päällekkäin ja suljennan varmuus tilanteissa, joissa purkkiin kohdistuu suuria ulkoisia kuormituksia. Tämän vaihtoehtoisen kannen tarkastelua varten luotiin jälleen CAD-malli, joka näkyy kuvassa 4.10.



**Kuva 4.10.** Alkuperäisen konseptin epäonnistuttua tehtiin suunnitteluprosessissa täyskäännös ja lähdettiin kehittämään kokonaan toisentyypistä kansikonseptia. Kuvassa 1) Kansi kuvattuna suoraan sivulta ja 2) yläviistosta.

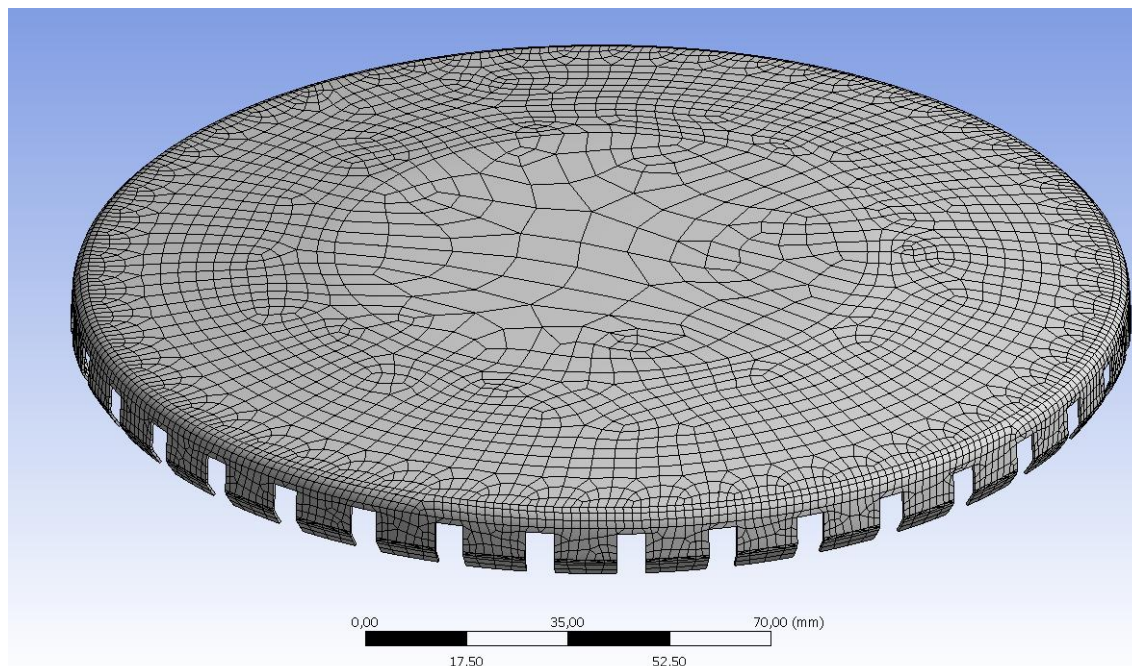
Tämän kansityypin toiminta siis perustuu yhteen isoon lommahdukseen, jonka seurauksena koko kansi muuttaa muotoaan. Yllä olevasta kuvasta voidaan havaita kaksi kannen toiminnan kannalta olennaista seikkaa. Ensinnäkin kuvan mukaisessa tilanteessa kannen ulkokehä on hieman kupera niin, että sen keskikohta on ulkoreunaa korkeammalla. Tällöin kansi on suljettuna. Toiseksi ulkoreunaa kehystävät ulokkeet, joiden tarkoitus on puristua kiinni maalipurkin yläreunan pyöristykseen kannen ollessa suljettuna. Näitä ulokkeita kutsutaan tästä eteenpäin selkeyden vuoksi ”kynsiksi”. Kannen toiminta perustuu näiden kahden yksityiskohdan vuorovaikutukseen. Kun kansi halutaan avata, painetaan sitä keskeltä alaspäin. Painettaessa riittävällä voimalla, tapahtuu kannessa kokonaisvaltainen läpilyönti-ilmiö, jolloin keskiosa lommahtaa reunan alapuolelle muodostaen peilikuvan alkuperäisestä asemastaan. Tämän lommahduksen seurauksena kannen reunalla olevat kynnet, kääntyvät hieman ulospäin. Kynsien tilalle voidaan kuvitella rengas, joka ympäröi maalipurkin reunaa. Purkin ollessa suljettuna tämä rengas on puristunut tiukasti maalipurkin reunaa vasten. Kynsien kääntyessä renkaan halkaisija kasvaa, jolloin se irtaoo purkista ja kansi voidaan nostaa pois paikaltaan. Kuvassa 4.11. nähdään vielä yksinkertaistettuna kannen toimintaperiaate.



**Kuva 4.11.** Yksinkertaistettu poikkileikkaus uudentyyppisen, yhteen koko kannen mittaiseen läpilyöntilommahtamiseen perustuvan rakenteen toimintaperiaatteesta. Kannen keskiosan painuessa alaspäin kehällä olevat kynnet päästävät irti purkista jolloin kansi voidaan avata.

Jo alustavissa rakenneanalyyseissä tämä vaihtoehtoinen rakenne tarjosi lupaavampia tuloksia, kuin alun perin suunniteltu kansityyppi. Vaikka ratkaistavaksi jäikin vielä joi-takin ongelmia, saatiin kannen käyttöön vaadittaville voimille ja siinä esiintyville jänni-tyksille selkeästi kohtuullisempia arvoja, mistä syystä alkuperäisen kannen kehitystyös-tä siirryttiin kehittämään tätä vaihtoehtoista kantta. Ajallisesti tässä vaiheessa alkuperäi-sen kannen kehitystyöhön ja laskennallisiin analyyseihin oli jo käytetty muutama kuu-kausi diplomityön tekemiseen varatusta ajasta. Jäljellä olevan ajan arvioitiin kuitenkin riittävän vielä pääosin uuden kansityypin tuotekehitykseen, joten sen keskeinen sisältö päätettiin sisällyttää diplomityöhön, vaikka lopullinen tuote ei ehtisikään valmistua ai-karajan puitteissa.

Uuden kannen rakenneanalyysiä varten luotiin CAD-malli, jonka elementtiverkotet-tu versio on nähtävissä kuvassa 4.12. Mallin reunaehdot on määritelty niin, että kannen reunan pystysuuntainen siirtymä on estetty maalipurkin reunan kanssa tapahtuvaa kon-taktia vastaavalta alueelta. Vaakasuunnassa tapahtuva siirtymä tulee kuitenkin sallia, sillä kannen toiminta nimenomaan perustuu tähän reunan kääntymisestä seuraavaan sivuttaissuuntaiseen siirtymään keskiosan lommahtaessa. Voima kohdistetaan suoraan alaspäin kannen keskelle, jolloin kynsien tulisi kääntyä ulospäin ja irrota maalipurkista.

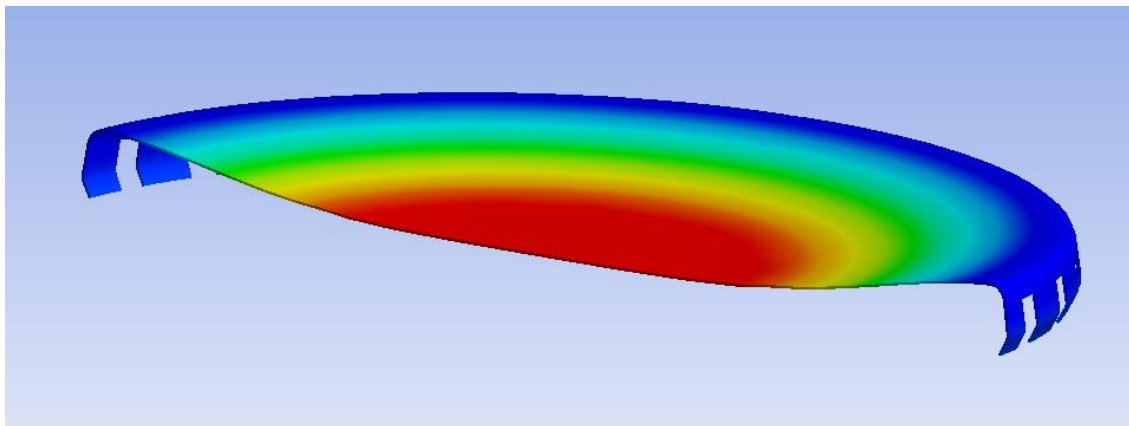


**Kuva 4.12.** *Uutta kansikonseptia varten luotu elementtiverkotettu malli kannesta. Kappale on tuettu ulkokehältään pystysuuntaisen liikkeen estämiseksi ja avaamisvoima kohdistetaan pystysuoraan kannen keskelle.*

Kannen lommahduksesta ja kynsien käyttäytymisestä suoritettiin muutamia alustavia rakenneanalyyskejä suoraan pastillirasian dimensioilla suurempaan mittakaavaan skaalattuna. Mittakaavan kasvattamisen seurauksena kannen avaamiseen vaadittavan voiman havaittiin nousseen liian suureksi, joten kannen mittoja oli muutettava alkupe raisestä mallista. Analyysiä varten luotiin pintamalli, jonka ainevahvuutta oli helppo muuttaa analyysien välillä. Kannen tuli olla riittävän jäykkä jotta se olisi kestävä eikä avautuisi vahingossa, mutta ei liian jäykkä jolloin sen käyttäminen vaatisi suhteettoman paljon voimaa. Useiden laskentakierrosten jälkeen päädyttiin lopulta tyydyttävään levynpaksuuteen, joka täytti nämä ehdot.

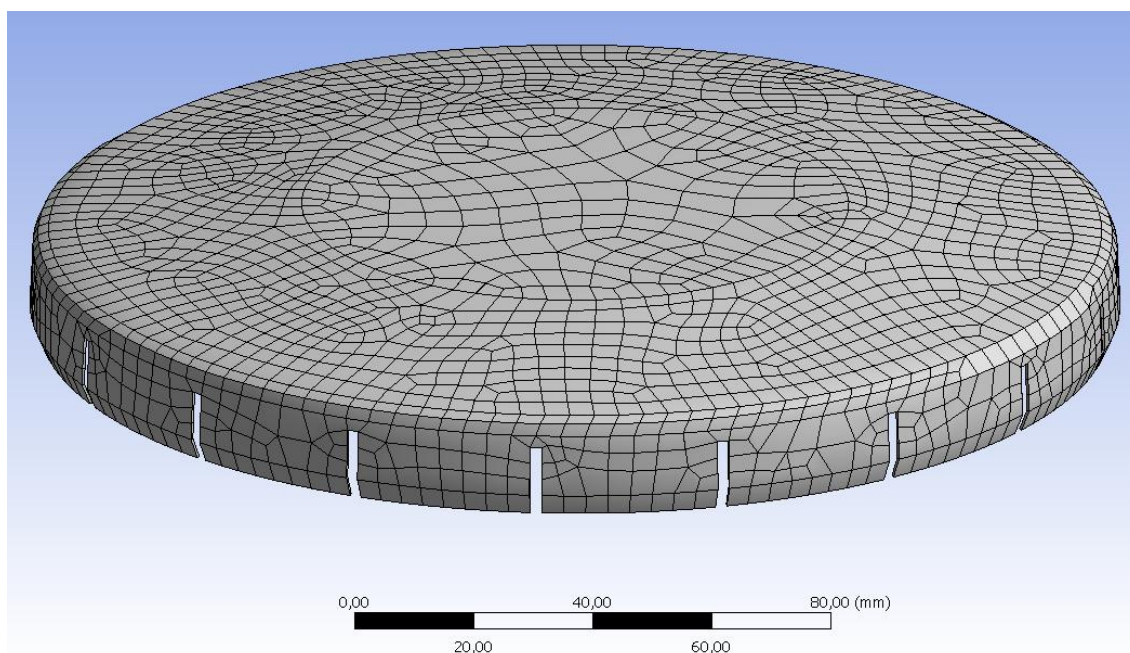
Mallin rakenneanalyysistä saatiin kuvan 4.13. mukainen tulos. Kuvatusta kannen lommahtamisen jälkeisen tilan poikkileikkauksesta nähdään, kuinka kansi painuu keskeltä alas, jolloin reunoilla olevat kynnet kääntyvät ulospäin. Kuvassa punainen väri kuvaa suurinta siirtymää ja sininen pienintä. Huomionarvoista on, että vaikka muodonmuutoskuvassa kannen ulkokehällä olevat kynnet näkyvät sinisinä, viitaten siihen etteivät ne liiku, ei tämä pidä aivan paikkaansa. Lähemmässä tarkastelussa havaittiin kynsien liikkeen olevan suhteessa kannen keskikohtaan niin pientä että värin muutos esiintyy niissä vain pienenä sävyeronä, luoden vaikutelman, ettei muodonmuutos etene kannen ulkoreunalle asti. Liikkeen arvioitiin kuitenkin olevan riittävän suuri mekanismin toiminnan kannalta, tosin tätä oli hankala varmistaa ilman fyysistä mallikappaletta.





**Kuva 4.13.** Siirtymien havainnollistamiseksi kansi on leikattu keskeltä kahtia. Analyysin tuloksena nähdään kuinka kannen kupera keskiosa painuu alas avaamisvoiman vaikutuksesta. Ulkokehällä olevat kynnet myös kääntyvät hieman ulospäin, mutta liike on suhteessa keskiosan siirtymään niin pieni, että sitä on vaikea havaita kuvasta.

Myös kannen kynsien leveydelle ja keskinäiselle tiheydellä kokeiltiin muutamia erilaisia vaihtoehtoja. Kummallakaan ei ainakaan kokeiluissa rajoissa tuntunut olevan merkittävää vaikutusta kannen käyttäytymiseen, tosin huomattavasti liian leveät kynnet olisivat kaarevuudestaan johtuen luultavasti muuttaneet rakenteen liian jäykäksi. Tiivistysyistä leveäkynntisen kannen oletettiin olevan parempi, sillä tällöin kannessa olisi mahdollisimman vähän rakoja, joista mahdollista vuotoa voisi tapahtua. Kynsien korkeuden todettiin vaikuttavan niiden suljentaliikkeen suuruuteen ja pidempien kynsien arvioitiin tarjoavan paremman puristusvoiman. Näillä perusteilla luotiin vaihtoehtoinen malli, jossa kynnet olivat korkeita ja leveitä ja niiden väliset raot hyvin pieniä.

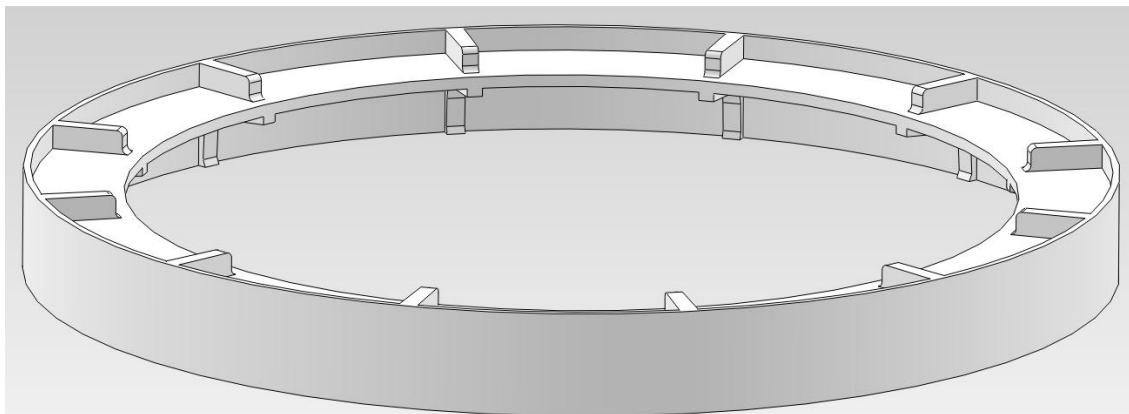


**Kuva 4.14.** Korkeampi ja leveäkynntinen kansi aiempaa pienemmällä raolla.

Lopulliseksi kanneksi muotoutui rakenneanalyysien tuloksena kuvien 4.12. ja 4.14. välimalli, joka on nähtävissä myöhemmin kuvissa 4.19 ja 4.20. Tämän kansityypin kupera muoto oli seikka, joka aiheutti joitakin huomattavia ongelmia. Ensinnäkin purkkeja olisi hankala pinota päällekkäin, sillä kupera kansi ei olisi kovin tukeva. Lisäksi painon laa- taaminen kannen päälle aiheuttaisi sen sisään painumisen, jolloin kansi toimintameka- nisminsa luonteesta johtuen avautuisi. Purkki saattaisi myös kuljetuksen tai varastoinnin yhteydessä pudota kannelleen, joka edelleen saisi kannen avautumaan, mikä ymmärret- tävistä syistä on epätoivottavaa. Kannen painamiseen perustuva toiminta oli ongelmalli- nen myös maalin sävytyksen kannalta. Sävytys toteutetaan painamalla kanteen reikä terävällä lävistystyökalulla. Tämän työkalun aiheuttama voima on riittävä avaamaan kannen, minkä lisäksi kannen painaminen terävällä kärjellä saattaisi aiheuttaa siihen toiminnan kannalta haitallisia muodonmuutoksia. Tässä vaiheessa jätettiin vielä avoi- meksi, tulisiko kansi sovellettavaksi sävytystä vaativien tuotteiden säilytykseen, vai käytettäisiinkö niiden kohdalla vanhoja kansityyppejä.

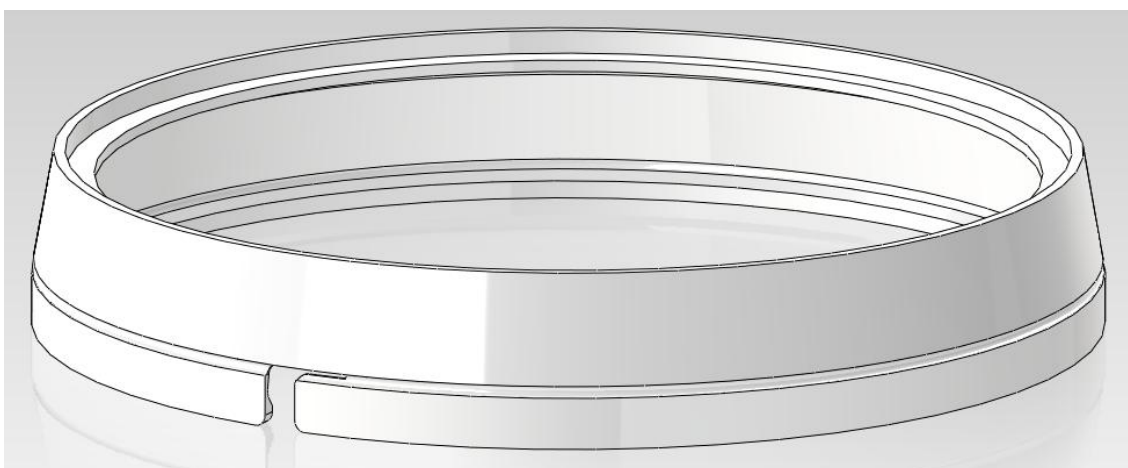
### *Varmistinrenkas*

Kannen kuperasta muodosta seuraavat haitat tuli eliminoida jollakin tavalla. Tähän tar- koitukseen ehdotettiin ensin kannen ulkopuolelle kuljetuksen ajaksi asennettavaa kutis- tussinettiä, joka lukitsisi ulokkeiden säteen suuntaisen liikkeen, vahvistaen kantta ja estäen sen tahattoman avautumisen. Tällainen sinetti ei kuitenkaan auttaisi kuperakan- tisten purkkien pinoamiseen liittyvässä ongelmassa, joten seuraava ehdotus olisi muo- vista valettava, suhteellisen jäykkä muovirenkas, joka kiinnitettäisiin kannen päälle. Tämän muovirenkaan tarkoituksena oli samanaikaisesti tukea kannen kynsiä säteen suunnassa niin, etteivät ne pääsisi liikkumaan renkaan ollessa paikallaan, sekä toimia tukialustana kannen päälle mahdollisesti asetettavalle toiselle purkille. Renkaan suunni- teltiin olevan kiinnitettävissä niin, että se voitaisiin irrottaa helposti ja nopeasti, vähin voimin ja ilman työkaluja maalipurkkia avattaessa, ja mahdollisesti painaa takaisin pai- kalleen varmistimeksi kun maalipurkki suljetaan. Muovirenkaasta kehiteltiin muutamia erilaisia CAD-malleja, joista kehitykseen valittiin kaksi vaihtoehtoista 4.15 ja 4.16 nä- kyvää mallia.



**Kuva 4.15.** Kannen päälle asetettava muovinen varmistinrenkas. Renkaan päätehtävä on tukea kantta ja varmistaa sen kiinnitys.

Ensimmäisessä varmistinrenkasvaihtoehdossa renkaan kehällä on pieniä ulokkeita jotka lukitsevat kannen paikalleen. Alareunan ulokkeiden tarkoitus on puristaa kantta kiinni, jolloin se ei pääse avautumaan renkaan ollessa paikallaan. Yläreunan ulokkeet on muotoiltu niin, että useampia maalipurkkeja pinottaessa kannen päälle asetettava purkki pysyy paikallaan.



**Kuva 4.16.** Vaihtoehtoinen malli varmistinrenkaaksi. Alareunassa näkyvän repäisysinetin avulla rengas irtaana helposti kannesta.

Jälkimmäisessä vaihtoehdossa renkaan alareunassa olisi lippa, josta repäisemällä renkaan alaosa irtaaisi vapauttaen renkaan purkista. Tällöin avaaminen olisi helpompaa, mutta purkin uudelleensuljennan kiinnitysvarmuus olisi heikompi. Kuten ensimmäisessäkin vaihtoehdossa, renkaan yläreuna on muotoiltu niin, että sen päälle voidaan tukevasti asettaa toinen maalipurkki. Kuvissa renkaiden keskellä näkyvä reikä mahdollistaa maalin sävytyksen kannen läpi renkaan ollessa paikallaan. Näistä kahdesta vaihtoehdoista lopulliseen tuotantoon todennäköisesti valikoituu ensimmäinen, johtuen purkin uudelleensuljettavuuden tärkeydestä ja jälkimmäisen vaihtoehdon valmistuksellisista

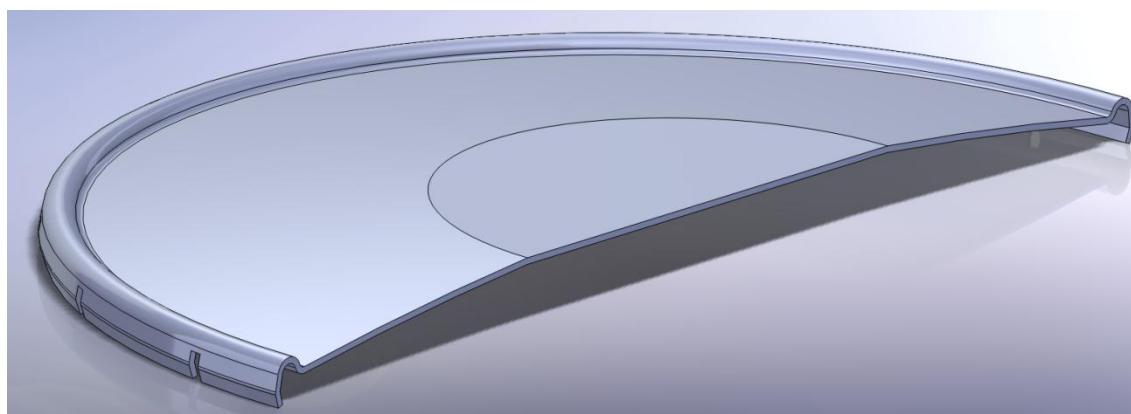


hankaluuksista. Renkaan käytettävyys on kuitenkin syytä varmistaa todellisen prototyypin avulla, jota vielä tätä työtä kirjoitettaessa ei ole ehditty valmistaa.

### *Tiivistys*

Kannen sileä ja kupera muoto aiheutti muiden ongelmien lisäksi hankaluuksia myös kunnollisen tiivistyksen aikaansaamisessa. Kuten kuvasta 4.12. voidaan nähdä, alkupe-  
räisessä mallissa kannen ulokkeiden väliin jäivät aukot nousevat melko lähelle kannen yläreunaa, jättäen purkin ja kannen väliin pieniä ilmarakoja. Tästä johtuen näitä aukkoja oli pakko madaltaa niin, että kannen ulkokehällä olisi yhtenäinen purkin reunaa kiertävä kannas, jota vasten tiivistekumi saataisiin asennettua. Muutoksella saattaisi kuitenkin olla negatiivinen vaikutus kannen toimintaan, sillä jo tässä vaiheessa oli alustavien ko-  
keilujen perusteella tiedossa, että aukkojen madaltaminen loisi kannen lommahtavan osan ja sen reunalla olevien ulokkeiden välille jäykän vyöhykkeen, joka pahimmillaan saattaisi eristää ulokkeet täysin kannen keskellä tapahtuvasta lommahduksesta. Kanteen tulisi siis muokata yhtenäinen, purkin ulkoreunan peittävä kannas, joka olisi tarpeeksi leveä tiivisteiden pakenemisen estämiseksi, muttei kuitenkaan liian leveä jolloin se estäisi ulokkeiden liikkeen lommahduksen seurauksena.

Kannen tasainen pinta oli hankala tiivisteiden asentamisen kannalta, sillä yleensä kan-  
sissa on jonkinlainen tiivisteura, johon nestemäinen tiiviste ruiskutetaan valmistusvai-  
heessa. Tällaisella tiivisteuralla epäiltiin olevan negatiivinen vaikutus kannen toimin-  
taan, sillä se todennäköisesti jäykistäisi rakennetta suhteellisen paljon. Täysin sileäpin-  
taisen kannen tapauksessa oli kuitenkin riski että tiiviste ei pysyisi paikallaan kannen  
ulkoreunalla, vaan leviäisi valmistuksen yhteydessä hallitsemattomasti pitkin kannen  
pintaa. Tiivisteuraa oli siis harkittava yhtenä vaihtoehtona, ja sitä varten suoritettiin eril-  
linen analyysi myös kannelle johon olisi painettu tällainen ura. Malli tiivisteurallisen  
kannen poikkileikkauksesta näkyy kuvassa 4.17.

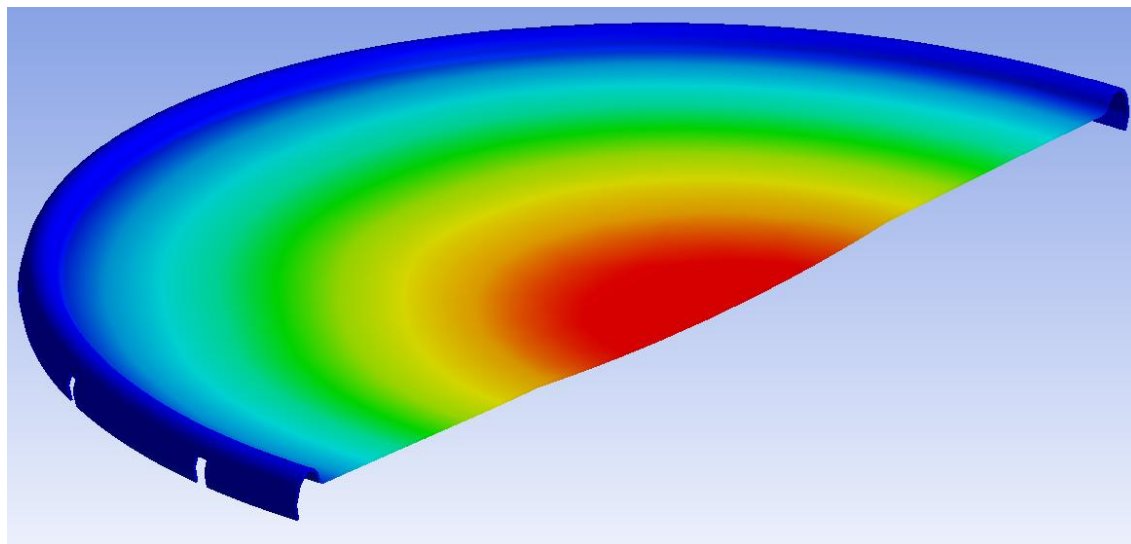


**Kuva 4.17.** *Poikkileikkaus tiivisteurallisesta kannesta.*

Analyysin tuloksena todettiin odotetusti, että tiivisteura toimii rakenteessa eristävänä  
vyöhykkeenä, minkä seurauksena muodonmuutos tapahtuu vain keskiosassa, eivätkä

kannen kehällä olevat kynnet tällöin liiku lainkaan. Uran ei siis voitu olettaa olevan toimiva vaihtoehto tiivistysongelman ratkaisemiseksi. Kuvasta 4.18. näkyy vielä analyysin tuloksena saatu siirtymäkenttä. Kuten edellä, punainen väri kuvaa suurinta siirtymää ja sininen pienintä.

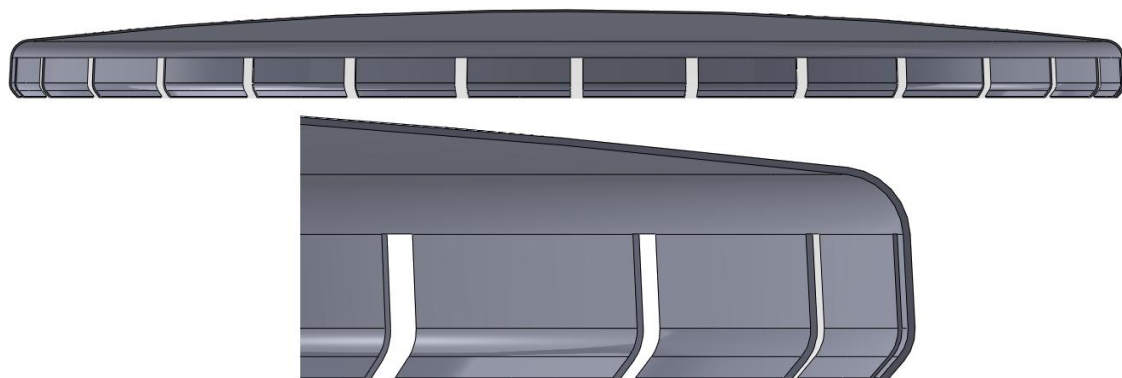
Eräs hieman vastaavassa sileässä kansirakenteessa käytetty tiivistysratkaisu oli kannen sisäpintaan liimattava pyöreä muovi- tai pahvilevy. Tällainen kiinteä pahvilevy olisi saattanut kuitenkin olla ongelmallinen johtuen kannen käytettäessä muuttuvasta muodosta, joka saattaisi johtaa tiivisteiden rakoiluun tai irtoamiseen. Tässä vaiheessa päätettiin tyytyä toteamaan, että ruiskutettava tiiviste olisi luultavasti mahdollista saada asettumaan kannen ulkokehälle valmistusvaiheessa, kun kansi on ylösalaisin ja avatussa asennossa, jolloin kannen keskiosa on reunaa ylempänä. Tällöin nestemäinen tiiviste valuisi painovoiman vaikutuksesta kohti kannen ulkoreunaa ja kuumennettaessa asettuisi paikalleen toivotulla tavalla. Lopullisia päätöksiä tiivistyksen toteuttamisesta ei voitu tässä vaiheessa tehdä, sillä tiivistemateriaalin valinnasta ei ollut suunnittelun aikana täyttä varmuutta, eikä materiaalin käyttäytyminen siis ollut tunnettu tekijä.



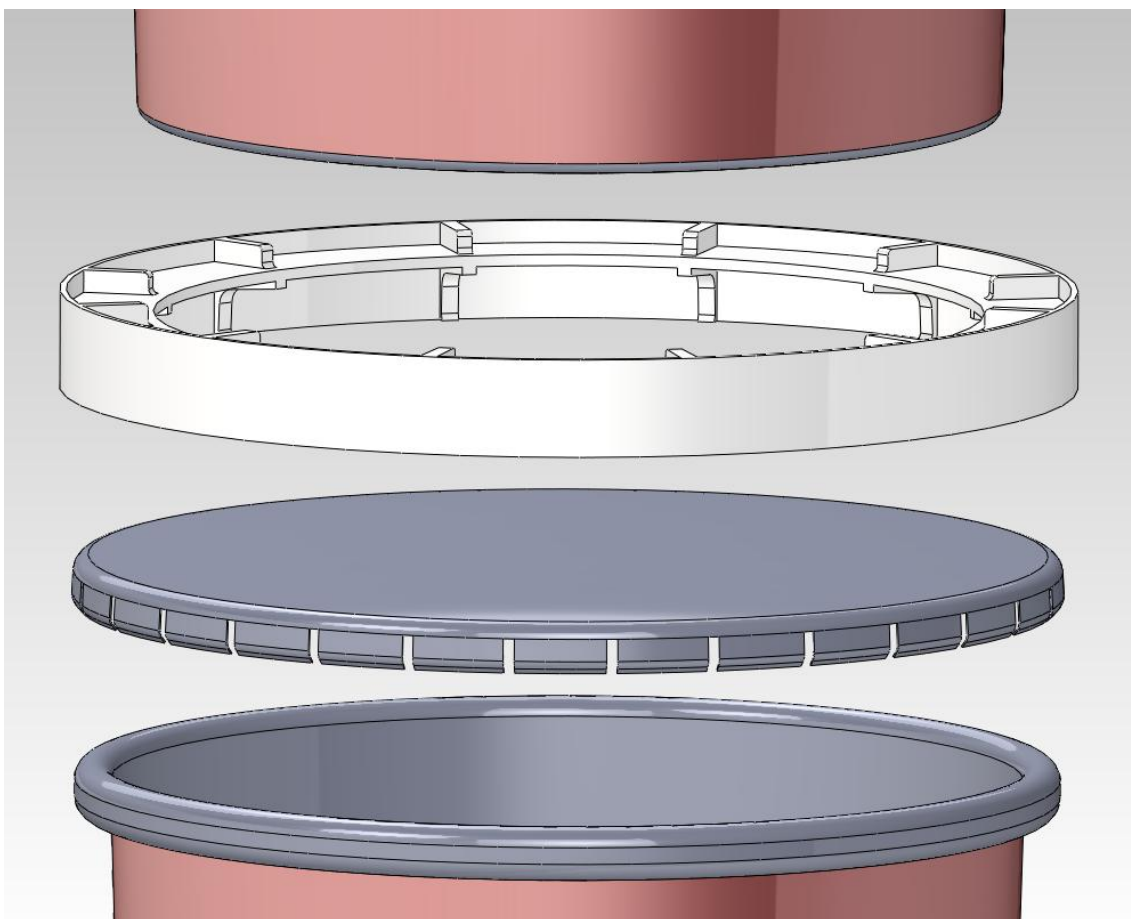
**Kuva 4.18.** Tiivisteuralla varustetun kannen siirtymäkenttä. Tiivisteura eristää lommamittavan osan kannen ulkoreunasta, jolloin kynnet eivät käänny ulospäin eikä kansi toimi toivotulla tavalla.

Tiivisteurasta luopumisen jälkeen kansi sai lopullisen, kuvien 4.19. ja 4.20 mukaisen muotonsa. Kannen kynnet suunniteltiin mahdollisimman leveiksi, ilman että niiden kaarevuus olisi alkanut merkittävästi vaikuttaa kannen jäykkyyteen. Kynsien väliset raot pyrittiin saamaan pieniksi, mahdollisten vuotokohtien minimoimiseksi. Huomionarvoista on, että kynsien korkeus ei sovi yhteen nykyisten maalipurkkien reunapyöristysten kanssa, vaan ne on suunniteltu noin kaksi kertaa korkeammalle reunapyöristykselle. Tämä johtuu siitä, että kynnen ollessa hyvin lyhyt, se ei ulospäin kääntyessään liiku tarpeeksi, jolloin kansi ei irtoa purkista kunnolla. Tästä johtuen kynsien pituutta jouduttiin pidentämään, minkä seurauksena kansi sopii yhteen sellaisen maalipurkin kanssa jonka reunapyöristys on normaalia korkeampi. Suunnittelussa on huomioitu yrityksen

tuotantolaitteiden säätövara niin, että samoilla koneilla on mahdollista valmistaa tällaisia purkkeja.



**Kuva 4.19.** Poikkileikkauskuva lopullisesta muodosta.



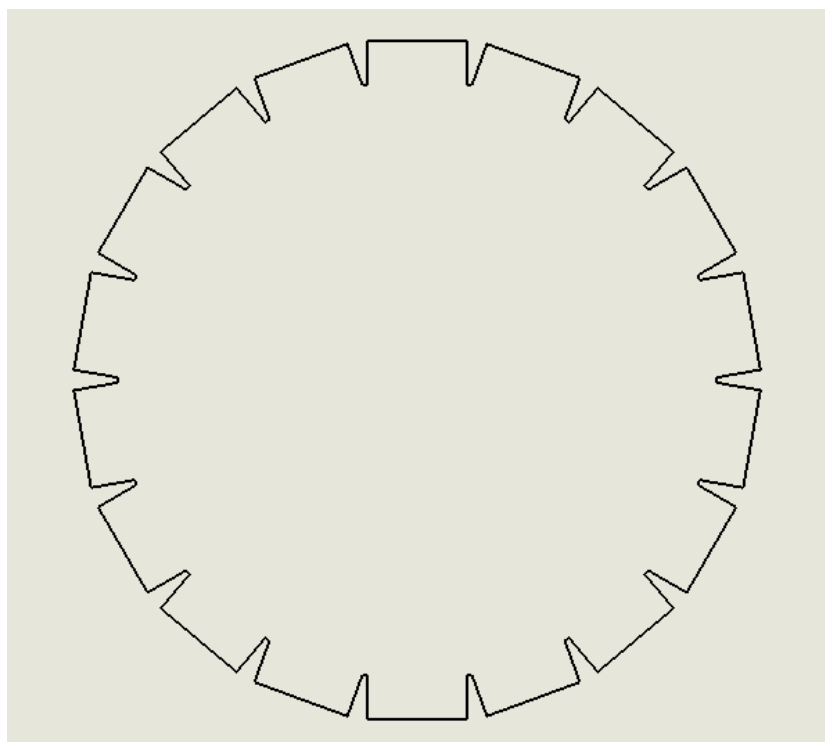
**Kuva 4.20.** Kokoonpanokuva lopullisesta tuotteesta.

#### 4.4 Prototyypin valmistuksen suunnittelu

Vaikka tämän työn keskeisenä aihealueena oli CAD-mallin luominen kehitettävästä tuotteesta ja tämän mallin laskennallinen toimivuustarkastelu, ehdittiin tätä työtä kirjoittaessa tehdä suunnitelmia myös tuotteen jatkokehitykselle. Tässä kappaleessa käsitellään vielä lyhyesti, minkälaisia toimenpiteitä ja jatkosuunnitelmia tehtiin fyysisen prototyypin osalta.

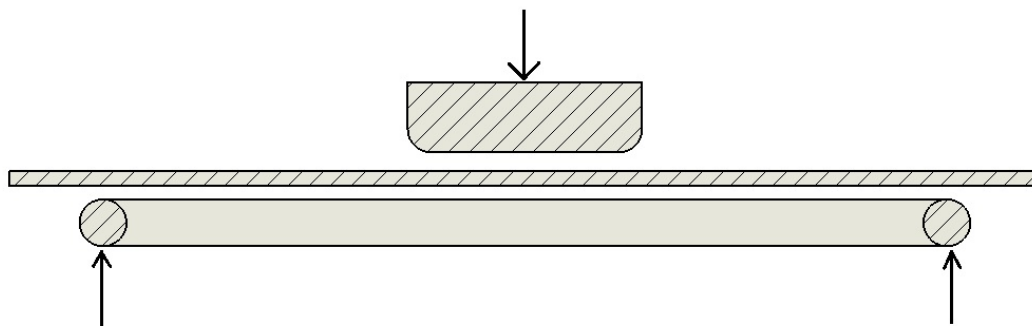
##### *Prototyyppi*

Vaikka mallin toimintaa testattiin lukuisin ANSYS – analyysin, ei näiden analyysien tuloksiin uskallettu sokeasti luottaa ilman fyysistä testikappaletta. Tästä johtuen tuli ennen varsinaisen tuotannon aloittamista luoda kannesta jonkinlainen prototyyppi, jolla saataisiin kokeiltua kannen toimintaa todellisessa tilanteessa virtuaaliympäristön ulkopuolella. Varsinaisen muottityökalun valmistaminen pelkästään prototyypin valmistamista varten olisi tullut tarpeettoman kalliiksi, joten prototyyppien luomiseen tuli löytää edullisempi tapa. Tarkoitusta varten teetettiin sopivan muotoisia vesileikkeitä, jotka oli tarkoitus muovata sitten sopivaksi jonkinlaisella puristimella. Vesileikkeen muoto on nähtävissä kuvassa 4.21.



**Kuva 4.21.** Prototyyppiä varten teetettiin ohuesta teräslevystä leikkeitä, jotka painettaisiin haluttuun muotoon.

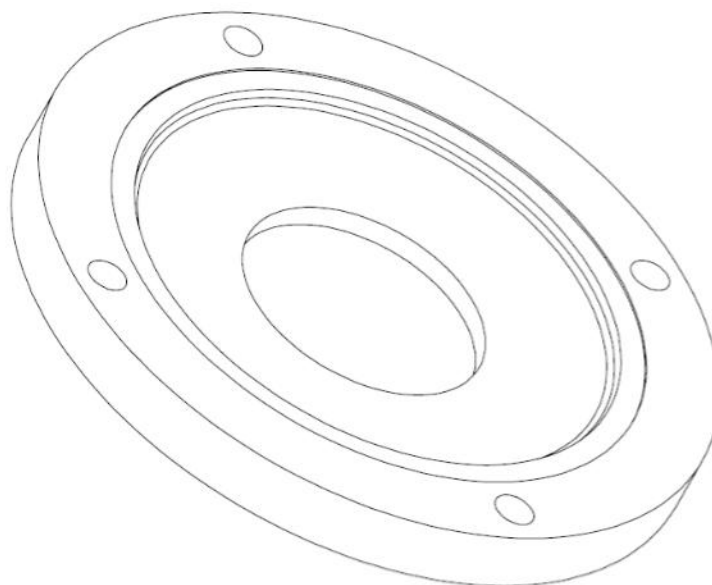
Aluksi koetettiin asettaa kansiaiho yksinkertaisesti sopivan kokoisen renkaan päälle ja painaa keskikohtaa pyöreällä pistimellä kuperan muodon saavuttamiseksi. Menetelmää on havainnollistettu kuvassa 4.22. Ongelmaksi tällä menetelmällä kuitenkin muodostui ohuen levyn rypistyminen, minkä seurauksena kansi lommahti epäsymmetrisesti, mikä oli luonnollisesti eliminointava lopullisesta prototyypistä. Ensimmäisten testien perusteella päätettiin, että edes prototyypin valmistus ei näin yksinkertaisella tavalla olisi mahdollista, joten valmistustyökalua alettiin kehittää muotoon joka olisi käytettävissä myös varsinaisen lopputuotteen valmistuksessa.



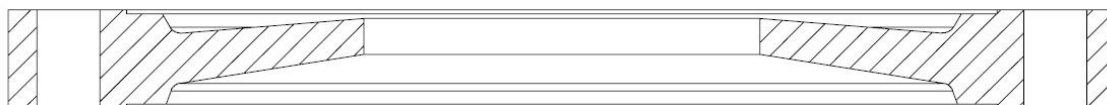
**Kuva 4.22.** Prototyyppiä yritettiin valmistaa yksinkertaisesti asettamalla levyaiho tuetun renkaan päälle ja painamalla sitä keskeltä pyöreällä pistimellä, mutta tällöin levyssä ilmeni epätoivottua rypistymistä.

Rypistymisongelman poistamiseksi päätettiin muuttaa työkalua niin, että kansi puristettaisiin kauttaaltaan alapuolella olevan muotin ja yläpuolelle asetettavan renkaan väliin, jolloin rypistymistä ei pääsisi tapahtumaan. Kannen ollessa reunoiltaan tukevasti kiinnitettynä voitaisiin keskikohta painaa sitten erillisellä pistimellä kuperaksi, jolloin rakenne oletettavasti saavuttaisi tavoiteltavan muodon. Levyn alle asetettava muottirenkas suunniteltiin kaksipuoleiseksi niin, että kannen valmistusta voitaisiin koittaa sekä avatussa, että suljetussa asennossa.

Rakennepuolueiden perusteella kansi saa hieman erilaiset lujuusominaisuudet riippuen siitä, onko se valmistusasennossaan suljettu vai avattu. Kannen todettiin olevan toivottavaa valmistaa suljetussa asennossa niin, että kynnet ovat kääntyneenä sisäänpäin, sillä tällöin avaaminen vaatisi hieman sulkemista enemmän voimaa, eikä kansi pyrkisi avautumaan vahingossa. Toisaalta tiivisteen asentamisen kannalta avattu valmistusasento oli toivottavampi. Tällöin nestemäinen tiivistemateriaali voitaisiin ruiskuttaa suoraan ylösalaisin käännetyyn kannen sisäpinnalle ja se asettuisi automaattisesti paikalleen painovoiman vaikutuksesta. Suljettu kansi voitaisiin toki lommauttaa avattuun asentoon ennen tiivisteen asentamista, mutta automaattisella valmistuslinjastolla tämä vaatisi ylimääräisen työvaiheen. Suunnitellun muottityökalun muotoilu on havainnollistettu kuvissa 4.23. ja 4.24. Tämän työn aikaraameissa valmistustyökalua ei ehditty saattaa lopulliseen muotoonsa, vaan kehitystyö jatkuu kolmannen osapuolen toimesta.



**Kuva 4.20.** Valmistuksessa muovattavan aihion alle asetettava muotti. Aihio keskittyy muottiin kuvassa uloimpana renkaana näkyvän matalan porrastuksen avulla.



**Kuva 4.21.** Poikkileikkaus muottityökalusta. Muotti on kaksipuoleinen, joten sitä kääntämällä voidaan kokeilla sekä oletusasennossaan avatun, että suljetun kannen valmistusta.

Yrityksen toimesta esitettiin myös toivomus vaihtoehtoisesta muottityökalusta, joka osaisi samanaikaisesti leikata ja muovata kannen muotoonsa suorakulmion mallisesta levyaihiosta suoraan yhdellä työiskulla. Tämä luonnollisesti asettaisi työkalun suunnittelulle suurempia haasteita, kuin edellä suunnitellun työkalun tapauksessa. Ajatuksena oli rakentaa muotti, joka iskun alkuvaiheessa leikkaisi pistimen alaosassa olevilla terillä aihion kuvan 4.21. mukaiseen muotoon, ja jatkaisi tämän jälkeen liikettä niin, että ylempänä pistimessä oleva muoto laskeutuisi iskun edetessä alas painaen kannen muotia vasten. Lisätoivomuksena oli pistimen keskiosassa olevan pyöreän korotuksen portaaton säädettävyys niin, että sen avulla saataisiin muutettua valmistettavan kannen kuiperan keskiosan syvyyttä. Tämän ominaisuuden tavoitteena oli mahdollisuus kokeilla yhdellä työkalulla erilaisia kansia käytännössä, sillä kannen keskiosan korkeus oli keskeinen tekijä kannen jäykkyydessä. Idea on kuitenkin tätä kirjoittaessa vielä täysin hahmotteluasteella, eikä varsinaista suunnittelutyötä leikkaavalle muotille ole ehditty aloittaa.

## 5 LOPPUTULOSTEN TARKASTELU

Tässä viimeisessä kappaleessa perehdytään vielä työn lopputuloksiin ja esitetään omaa pohdintaa projektin aikana ilmenneistä seikoista. Projektin alussa asetetut tavoitteet ovat tulleet jokseenkin täytettyä. Alkuperäiselle konseptin toiminnasta saatiin muodostettua suuntaa-antava kuva rakenneanalyysien perusteella. Vaikka konsepti ei päätyntykään jatkokehitykseen, luotiin tämän työn tuloksena alustavat suunnitelmat uudentyyppiselle maalipurkin kannelle. Vaikka työn tuloksena ei päädytty vielä lopulliseen tuotantoon, saatiin suoritettujen rakenneanalyysien perusteella lupaavia tuloksia tuotteen toiminnasta.

Työn alkuvaiheessa todettiin elementtimenetelmän keinoin muotoilijoiden suunnitteleman esikonseptin soveltuvan heikosti tarkoitukseen, sillä liuskojen lommahtaminen olisi vaatinut suuria voimia ja aiheuttanut materiaaliin kohtuuttomia jännityksiä. Mekanismi itsessään olisi voinut olla toimiva, mutta sovelluksen mittakaavassa ja muodossa pienten, toisiinsa kytkettyjen metalliliuskojen lommahtaminen ei tapahtunut toivotulla tavalla. Materiaalin ainevahvuutta pienentämällä ja kannen muotoilua muuttamalla olisi mahdollisesti päästy parempiin tuloksiin, mutta tästä olisi voinut seurata muita ongelmia kannen jäykkyyden ja valmistettavuuden kannalta. Lisäksi merkittävät muutokset kannen muotoon olisivat todennäköisesti vaatineet myös täysin uudenmallista maalipurkkiä. Tämän työn yhteydessä suoritettujen tarkastelujen perusteella ei alkuperäistä ideaa voida täysin hylätä, mutta lienee turvallista todeta että toimiakseen mekanismi vaatisi täysin toisenlaista muotoilua. Eräs lähestymistapa voisi olla suorakulmainen maalipurkki, jolloin saataisiin eliminoidua rakennetta jäykistävä liuskojen kaksoiskaarevuus.

Ennen työn aloittamista esiteltiin toivomuslista, näiden toivomusten voidaan katsoa täyttyneen kohtalaisen hyvin. Vaikka välttämättä kaikkia käyttäjien asettamia toivomuksia ei kyetty tyydyttämään, säilyi kehitystyössä silti perusajatus helppokäyttöisestä ja turvallisesta maalipurkinkannesta loppuun asti. Suunnitelmien mukaisesti kansi on avattavissa helposti ilman työkaluja, mikä oletettavasti vähentää maalipurkin avaamisen yhteydessä tapahtuvia vahinkoja. Purkki voidaan sulkea uudelleen käytön jälkeen ja varmistinrenkaan avulla saadaan aikaan varma suljenta. Uusien ominaisuuksien merkitys saadaan todella selville vasta tuotteen tullessa käyttäjien saataville. Ylimääräinen muovirengas tulee luultavasti nostamaan maalipurkin kustannuksia jonkin verran ja nähtäväksi jää onko hinnassa tapahtuva korotus liian suuri. Lopullisen tuotteen valmistuttua voi olla aiheellista päästää markkinoille ensin pieni koe-erä ja suorittaa tämän perusteella uusi asiakastutkimus käyttäjien suhtautumisen selvittämiseksi uutta purkki-mallia kohtaan. Näin voidaan saada parempi kuva kannen massatuotannon kannattavuudesta.

Perustettaessa suunnittelu tietokonemallien antamiin tuloksiin täytyy muistaa, että rakenneanalyysien tulokset ovat suuntaa antavia. Elementtianalyysissa tuloksiin vaikuttavat huomattavasti käytetyt elementtityypit ja laskentamenetelmät. Epälineaarissa elementtimenetelmässä havaittiin simulaatioiden lopputulosten välillä olevan selviä eroja, kun laskentatarkkuus muuttui epälineaarisen analyysin ratkaisuun käytetyn linearisoinnin askellustiheyden vaihdellessa. Analyysin yhteydessä tulee varmistaa, että simulointimalli, sekä siihen kohdistuvat tuennat ja kuormitukset vastaavat mahdollisimman hyvin todellista tilannetta. Lopullisen tuotteen valmistuttua onkin mielenkiintoista nähdä, kuinka hyvin kannen todellinen käyttäytyminen vastaa analyysien tuloksia.

Ennen kannen kunnollista testausta on vielä epävarmaa soveltuuko se maalin varastointiin. Kansi ei muotoilustaan johtuen salli suurta mittojen vaihtelua, sillä siinä ei ole erillistä tiivisturaa, jota vasten maalipurkin reuna saataisiin tukevasti asetettua. Vaikka kansi onkin suunniteltu sopimaan tarkasti maalipurkkiin, esiintyy todellisten kappaleiden yksityiskohdissa usein pieniä epätäydellisyyksiä, jotka saattavat tässä tapauksessa aiheuttaa ongelmia tiivistyksessä. Erityisen huolestuttava on viranomaisten vaatima pudotustesti, sillä ainakin suurempia purkkikokoja testattaessa kokevat sekä kannet että purkit usein suuria muodonmuutoksia. Vaikka kantta onkin suojaamassa erillinen muovirengas, saattaa sen suoja olla riittämätön suuren kuormituksen alla. Mikäli kannen todetaan testien perusteella soveltuvan huonosti maalipurkkiin, on eräänä vaihtoehtona tietenkin soveltaa sitä johonkin muuhun tarkoitukseen, esimerkiksi kiinteiden aineiden varastointiin.

Alkuperäisessä suunnitelmassa toivomuksena oli, että uusi kansityyppi olisi mahdollisimman hyvin yhteensopiva jo olemassa olevien maalipurkkien kanssa. Kannen toimintaperiaatteesta johtuen tätä oli kuitenkin hankala toteuttaa, sillä vanhojen purkki-tyyppien kanssa täysin yhteensopivan muodon priorisointi olisi aiheuttanut ongelmia muilla osa-alueilla, kuten kannen tiiviyydessä ja sitä kiinni pitävien voimien suuruudessa. Tämän työn puitteissa ei vielä täysin päästy muotoon joka täyttäisi edellä mainitun toiveen, mutta kannen kanssa yhteensopiva purkkimalli eroaa nykyisen tuotekannan purkeista muodoltaan ja mitoiltaan pitkällisen suunnittelun jälkeen enää vain yläreunassaan olevan reunapyöristyksen korkeuden osalta. Tässä vaiheessa voidaan mainita, että vielä tarkentamalla kannen ja sen kynsien muotoilua saattaa olla mahdollista päästä ratkaisuun joka toimisi yhdessä vanhempien purkkimallien kanssa, mutta tällöin kannesta tulee luultavasti vielä entistä herkempi mahdollisille mittavirheille.



## 6 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli kehittää Metalpak Oy:n tuotevalikoimaan uudentyyppinen maalipurkki. Rakenteen kehitystyö on ollut pääasiassa asiakaslähtöinen projekti, jonka ehdot ovat määräytyneet ennen suunnittelua suoritettun asiakaskyselyn perusteella. Lopputulokseen ovat vaikuttaneet myös maalipurkkien turvallisuutta koskeva lainsäädäntö ja valmistustekniset näkökohdat. Työn tuloksena on saatu aikaan suuntaa antavat suunnitelmat uudelle maalipurkin kannelle, jonka uskotaan olevan sovitettavissa olemassa olevaan maalipurkkikantaan ilman muutoksia purkin rakenteeseen.

Nykypäivänä käytössä olevilla maalipurkeilla ja niiden kansilla on omat ongelmansa joita tässä työssä suunnitellussa kansityypissä on pyritty välttämään. Useiden kansien avaamisessa joudutaan käyttämään erillisiä työkaluja ja huomattavan suuria voimia, jolloin käyttäjä voi helposti loukkaantua. Joillakin kansityypeillä on ongelmia tiivistyksen ja uudelleensuljettavuuden kanssa, jolloin käyttämättä jääneen maalin laatu voi heikentyä sen odottaessa seuraavaa maalauskertaa. Uuden kansimallin suunnittelussa on pyritty korostamaan helppokäyttöisyyttä ja hyvää uudelleensuljettavuutta. Tavoitteena on ollut luoda tuote, joka olisi avattavissa ja suljettavissa käsivoimin ilman työkaluja ja joka sulkeutuisi tiiviisti vielä useankin käyttökerran jälkeen. Idea lopulliseen malliin saatiin ohutlevyrakenteen läpilyöntilomahdukseen perustuvasta pastillirasian kanteesta, jota jalostettiin soveltumaan paremmin maaliteollisuuden vaatimuksiin.

Maalipurkkien turvallisuutta koskevassa lainsäädännössä määritellään tarkoin, min-kälaiset kuormitustestit täytetyn maalipurkin tulee läpäistä ennen kuin sitä voidaan sallia käytettävän aineiden kuljetukseen maantiellä. Testit simuloivat tilanteita, joissa purkki putoaa kuljetuksen aikana kovalle alustalle, sen sisäinen paine kasvaa huomattavasti tai sen päälle kasataan suuria kuormia. Näissä testeissä purkin ja kannen rakenteisiin kohdistuu niin suuria kuormia, että niiden muoto muuttuu lähes poikkeuksetta. Tämä on täytynyt huomioida suunnittelussa ja kansi onkin pyritty suojaamaan niin, että aukeaminen yllättävässä tilanteessa olisi mahdollisimman epätodennäköistä.

Uuden kansimekanismin suunnittelussa asiakkaiden merkitys on ollut hyvin keskeinen. Työn lähtökohtana olleessa asiakaskyselyssä käyttäjät jaettiin maalialueisiin, ammattimaalareihin, ja satunnaisiin maalareihin. Näiltä kultakin ryhmältä kerättiin lista hyvälle maalipurkille asetettavista toivomuksista ja vaatimuksista, jota sitten käytettiin tuotekehitysprojektin tavoitteiden asettamiseen. Vaikka kaikkia toiveita ei ollut mahdollista ottaa samanaikaisesti huomioon yhden tuotteen suunnittelussa, pyrittiin projekti toteuttamaan asiakaslähtöisesti niin, että saataisiin aikaan mahdollisimman hyvin käyttäjien tarpeita vastaava tuote.

Rakenneanalyysin lähtökohtana oli optimoida kansimekanismin dimensioita tietyt näkökohdat huomioon ottaen. Kannen avaamiseen ja sulkemiseen vaadittavan voiman tulisi pysyä niin pienenä että käyttäjä ei tarvitsisi minkäänlaisia työkaluja. Samanaikaisesti kannen jäykkyys oli kuitenkin saatava riittävän suureksi tiiviin ja turvallisen suljennan takaamiseksi. Kannen täytyisi avattaessa ja suljettaessa tapahtuvan lommahtamisen jälkeen saavuttaa stabiili tasapainoasema, jotta se pysyisi käyttäjän haluamassa asennossa. Lisäksi kansimekanismissa tapahtuvan liikkeen tuli tapahtua täysin elastisesti, niin etteivät siihen kohdistetut voimat aiheuttaisi plastisia muodonmuutoksia. Suunnittelussa oli myös huomioitava käytettävissä olevat valmistusmenetelmät ja materiaalit, sillä tuotteen valmistus tuli olla lisättävissä yrityksen tuotantoon kustannusten nousematta liian suuriksi. Itse kannen lisäksi suunniteltiin erillinen muovirengas, jonka tehtävä olisi varmistaa kannen suljenta epätoivotun aukeamisen välttämiseksi, suojata kantta siihen kohdistuvilta ulkoisilta kuormituksilta ja toimia tukirakenteena kun useita purkkeja pinotaan päällekkäin.

Lopullisen kannen toimivuus on vielä syytä testata fyysisellä prototyypillä. Prototyyppiä varten valmistettiin sopivan paksuisesta teräslevystä leikkeitä joita yritettiin taivuttaa kannen mukaiseen muotoon erinäisin menetelmin, mutta tämän työn puitteissa ei vielä ehditty ottaa käyttöön työkaluja, joilla olisi saatu aikaan toimiva ja mittatarkka kopio suunnitellusta kannesta. Alustavat kokeilut antoivat kuitenkin positiivisia viitteitä laskennallisen mallin ja todellisen kappaleen käyttäytymisen yhteneväisyyksistä. Kannen valmistusmenetelmästä ja siihen käytettävistä työkaluista tehtiin joitakin hahmotelmia, mutta varsinainen valmistuksen suunnittelu on siirretty kolmannelle osapuolelle.

## LÄHDELUETTELO

### PAINETUT LÄHTEET

/1/ Outinen, Hannu – Salmi, Tapio – Koski Juhani. Lujuusopin Perusteet. Klingendahl Paino Oy. Tampere. 2003.

/2/ Lakikokoelma 2005. Vaarallisten aineiden kuljetus tiellä. Edita Publishing Oy. Helsinki. 2005.

/3/ Brauer, John R. What every engineer should know about finite element analysis. Dekker, cop. New York. 1988

/4/ Backus, Walter E. – Mello, Raymond M. Some applications of finite element analysis to shell buckling prediction. The Boeing Company Seattle. Washington. 1968.

/5/ Polat, C. – Ulucan, Z. Geometrically Non-linear Analysis of Axisymmetric Plates and Shells. Firat University, Faculty of Engineering. Elazig, Turkey. 2007.

### PAINAMATTOMAT LÄHTEET

/6/ Asiakas- ja käyttäjälähtöinen tutkimus- ja kehitysprojekti. Metalpak Oy – Länsi-Suomen muotoilukeskus Muova. Tampere/Vaasa. 2009.

/7/ Mikkola, Miikka. Maalipurkin kannen uuden tyyppisen sulkemismekanismin tarkastelua. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 2010.

/8/ Pajunen, Sami. Elementtimenetelmän jatkokurssi. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 2009.

### VERKKOLÄHTEET

/9/ Nonlinear finite elements / Nonlinearities in solid mechanics. Wikiversity. [www-sivu]. [viitattu 15.12.2011] Saatavissa  
[http://en.wikiversity.org/wiki/Nonlinear\\_finite\\_elements/Nonlinearities\\_in\\_solid\\_mechanics](http://en.wikiversity.org/wiki/Nonlinear_finite_elements/Nonlinearities_in_solid_mechanics)

/10/ ESDEP – Eurooppalainen teräsrakenteiden suunnittelun koulutusohjelma. Koulutuspaketti [www-sivu]. [viitattu 25.5.2011]. Saatavissa  
<http://www.terasrakenneyhdistys.fi/Esdep/index.html>

/11/ Ansys Release 11.0 Documentation. 8.11. Unstable Structures [www-sivu]. [viitattu 22.11.2011]. Saatavissa  
[http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/Hlp\\_G\\_STRUNST.html](http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/Hlp_G_STRUNST.html)

/12/ Elementtimenetelmän perusteet. Matti Lähtenmäki. Tampereen ammattikorkeakoulu. [www-sivu]. [viitattu 17.12.2011]. Saatavissa  
[http://home.tamk.fi/~mlahten/arkistot/elpe\\_pdf/johdanto.pdf](http://home.tamk.fi/~mlahten/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf)